

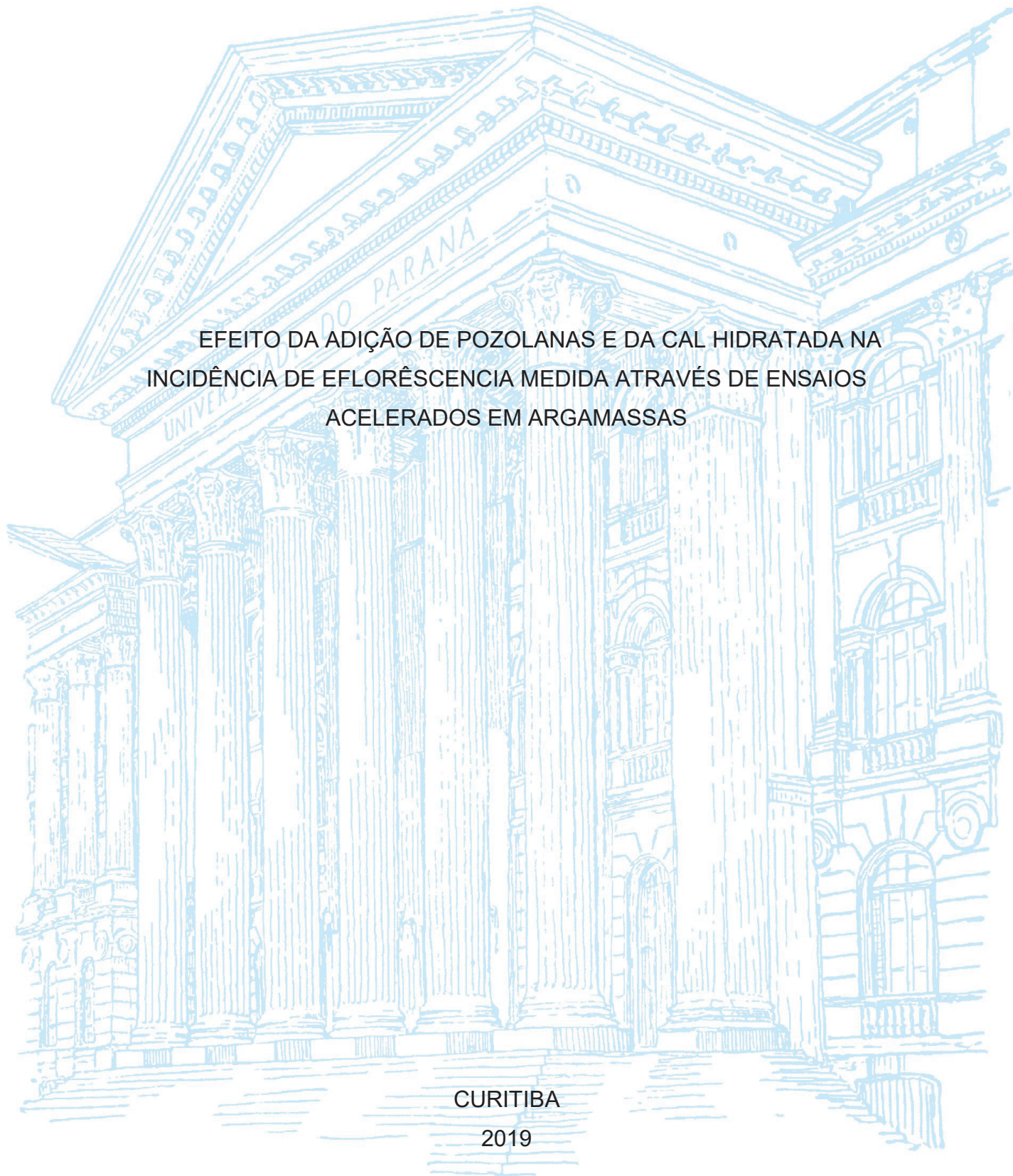
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIOGO HENRIQUE DE BEM

EFEITO DA ADIÇÃO DE POZOLANAS E DA CAL HIDRATADA NA  
INCIDÊNCIA DE EFLORESCÊNCIA MEDIDA ATRAVÉS DE ENSAIOS  
ACELERADOS EM ARGAMASSAS

CURITIBA

2019



DIOGO HENRIQUE DE BEM

EFEITO DA ADIÇÃO DE POZOLANAS E DA CAL HIDRATADA NA  
INCIDÊNCIA DE EFLORESCÊNCIA MEDIDA ATRAVÉS DE ENSAIOS  
ACELERADOS EM ARGAMASSAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros  
Júnior

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

B455e Bem, Diogo Henrique de

Efeito da adição de pozolanas e da cal hidratada na incidência de eflorescência medida através de ensaios acelerados em argamassas [recurso eletrônico] / Diogo Henrique de Bem, 2019.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração em Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná  
Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Júnior

1. Concreto 2. Argamassa. 3. Cal – indústria. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros Júnior, Ronaldo Alves de. III. Título.  
CDD 6624.1834

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



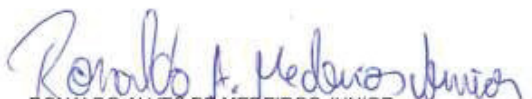
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DIOGO HENRIQUE DE BEM** intitulada: **Efeito da adição de pozolanas e da cal hidratada na incidência de eflorescência medida através de ensaios acelerados em argamassas**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 18 de Março de 2019.

  
RONALDO ALVES DE MEBEIROS JUNIOR  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
MARIENNE DO RÓCIO DE MELLO MARON DA COSTA  
Avaliador Interno (UFPR)

  
EDUARDO PEREIRA  
Avaliador Externo (UEPG)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior, pela confiança, orientação e apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC), aos professores, técnicos de laboratório e colegas.

À CAPES/CNPQ pela aquisição de materiais e equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Ao laboratório de construção civil da UTFPR pelo espaço e realização de ensaios, em especial ao professor Dr. José Alberto Cerri e a equipe de laboratório (Gustavo Macioski e Felipe Perretto).

À minha esposa, Heloisa Galdi, e aos meus pais pela confiança e apoio durante a realização desta pesquisa.

Aos professores da banca pelo tempo despendido na leitura deste trabalho e para a realização dos apontamentos de melhoria.



## RESUMO

Tanto as estruturas de concreto, como os revestimentos, estão sujeitos a diversos tipos de manifestações patológicas que podem comprometer a sua conservação e durabilidade. Uma das manifestações patológicas mais observadas em estruturas cimentícias é a eflorescência. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da adição de pozolana e da cal hidratada na incidência desta manifestação patológica. Devido a inexistência de um ensaio normatizado para avaliar a eflorescência em materiais cimentícios, primeiramente foram testadas diferentes metodologias de ensaio a fim de encontrar quais delas conseguem satisfatoriamente acelerar a formação da eflorescência em argamassas. Posteriormente, foram escolhidas três metodologias para avaliar a substituição de cimento por 5 e 10% de sílica ativa e 15 e 50% de cinza volante no traço padrão 1:0,5:9 (cimento:cal:areia) em massa. Avaliou-se também o efeito do aumento da dosagem de cal e da sua completa remoção sobre o aparecimento de eflorescência. Para isso, foram moldadas pastilhas de argamassa de 50x50x25 mm, com cimento CPV-ARI e cal hidratada CH-III. Após três períodos de cura (7, 28 e 91 dias), as pastilhas foram sujeitas as três condições diferentes de ensaio durante 28 dias. Após este prazo, quantificou-se a área afetada pela eflorescência através de uma análise gráfica no software MATLAB. Ensaio complementares de porosimetria de mercúrio, absorção, DRX e TGAs também foram realizados. Ao final dos ensaios percebeu-se que as metodologias que mais formaram eflorescência foram aquelas que aplicaram pressão de água para aumentar a permeabilidade, seguido do método que utilizou uma temperatura mais elevada na superfície das pastilhas para aumentar a taxa de evaporação. Notou-se ainda que o aumento da quantidade de cal também gerou um incremento na quantidade de eflorescência formada. Por outro lado, o uso de sílica ativa reduziu a quantidade de eflorescência com todas as idades de cura. Já a utilização de cinza volante somente apresentou resultado favorável à redução com o período de cura de 91 dias. Períodos menores geraram um aumento na eflorescência formada.

Palavras-chave: Eflorescência; Argamassa; Cal Hidratada; Pozolana; Ensaio Acelerado, Estrutura Cimentícia

## **ABSTRACT**

Concrete structures, as well as mortar rendering are subjected to different pathological manifestations, which may compromise the conservation and durability of those structures. One of the manifestations most observed in cementous structures is the efflorescence. This dissertation has the objective to analyse the influence of the usage of pozzolans and hydraulic lime on this pathological manifestation. Due to the nonexistence of a parametrized test to evaluate the appearance of efflorescence, firstly nine different methodologies were tested in order to assess which of them would satisfactorily accelerate the formation of efflorescence. Subsequently, three methodologies were chosen to evaluate the use of 5 e 10% of silica fume, 10 and 15% of fly ash with a mix of 1:0,5:9 (cement, lime and sand). The effect of different dosages of hydraulic lime were also investigated. To the accelerated tests, specimens of 50x50x25mm were casted using CPV-ARI cement and CH-III lime. After 7, 28 and 91 days of cure, the specimens were subjected to the accelerated tests for 28 days. In order to evaluate the amount of efflorescence formed, a graphic analysis using MATLAB were performed. Supplementary test of mercury permeability, absorption, XDR, TGA were also used to assist the interpretation of the results observed. At the end of the tests, it was noticed that use of pressure increased the most the amount of efflorescence formed, followed by the method that consisted in rising the temperature of the surface of the specimens in order to increase the evaporation rate. Besides, it was also noticed that the bigger the amount of hydraulic lime, also bigger was the formation of efflorescence. The usage of silica fume reduced the formation of efflorescence, while the use of fly ash was only able to reduce this manifestation when 91 day cure was applied. Using a shorted period of cure, an opposite effect was observed, increasing the formation of efflorescence.

Palavras-chave: Efflorescence, Mortar, Lime, Pozzolan, Accelerated test, Cimentous Matrix

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EFLORESCÊNCIA EM VIGAS DE GARAGEM .....	13
FIGURA 2 – LIXIVIAÇÃO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO COM FORMAÇÃO DE ESTALACTITES.....	17
FIGURA 3 – FORMAÇÃO DE EFLORESCÊNCIA E SUBEFLORESCÊNCIA .....	21
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE BLAINE E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO DE POZOLANAS COM DIFERENTES FINURAS.....	28
FIGURA 5 – PICO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO .....	31
FIGURA 6 – PICO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO COM SUBSTITUIÇÃO E ADIÇÃO DE CIMENTO POR 10% DE CINZA VOLANTE .....	31
FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS SEM METACAUIM.....	33
FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS COM ADIÇÃO DE METACAUIM .....	33
FIGURA 9 – MODELO DO TESTE SOB PRESSÃO.....	41
FIGURA 10 – APARELHO UTILIZADO NO ENSAIO ACELERADO.....	42
FIGURA 11 – ANÁLISE DA EXTENSÃO DA EFLORESCÊNCIA PELO SOFTWARE MATLAB COM TEOR DE METACAUIM VARIANDO DE 0 A 25% ..	45
FIGURA 12 – ANÁLISE DE TONS DE CINZA E POSTERIOR CONVERSÃO PARA IMAGEM BINÁRIA .....	45
FIGURA 13 – EXEMPLO DA ANÁLISE DA ESCALA DE CINZA DE DUAS AMOSTRAS DISTINTAS .....	46
FIGURA 14 – ANÁLISE GRÁFICA COM DIFERENTES TEORES DE LAMA VERMELHA (0 A 30%) .....	47
FIGURA 15 – ANÁLISE GRÁFICA DA EFLORESCÊNCIA.....	47
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DO EXPERIMENTO .....	50
FIGURA 17 – TERMOGRAVIMETRIA DA CAL .....	53
FIGURA 18 – DIFRAÇÃO DE RAIO-X DA SÍLICA ATIVA, COM ÊNFASE NO HALO AMORFO .....	55
FIGURA 19 – DIFRAÇÃO DE RAIO-X DA CINZA VOLANTE, COM ÊNFASE NO HALO AMORFO.....	55
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	56
FIGURA 21 – CROQUI DA CONDIÇÃO “V” .....	60
FIGURA 22 – CROQUI DA CONDIÇÃO “VIII” .....	61



FIGURA 23 – EXEMPLO DE ANÁLISE GRÁFICA FEITA NO MATLAB.....	62
FIGURA 24 – FATORES FIXOS E VARIÁVEIS DA PESQUISA.....	64
FIGURA 25 – RESULTADO DE 270MM NA MESA DE CONSISTÊNCIA .....	66
FIGURA 26 – PASTILHAS E CPS PRISMÁTICOS MOLDADOS .....	68
FIGURA 27 – DISPOSIÇÃO DAS PASTILHAS NOS ENSAIOS .....	69
FIGURA 28 – EXEMPLO ANÁLISE MATLAB .....	76
FIGURA 29 – RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS AOS 28 DIAS.....	77
FIGURA 30 – ÁREA AFETADA PELA EFLORESCÊNCIA EM CADA METODOLOGIA .....	77
FIGURA 31 – EVOLUÇÃO DA EFLORESCÊNCIA COM O TEMPO .....	78
FIGURA 32 – TGA DA ARGAMASSA DE REFERÊNCIA.....	82
FIGURA 33 – TGA DO MATERIAL DA EFLORESCÊNCIA .....	82
FIGURA 34 – DRX DO MATERIAL DA EFLORESCÊNCIA.....	84
FIGURA 35 – QUANTIDADE DE PORTLANDITA EM CADA TRAÇO.....	86
FIGURA 36 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DAS ARGAMASSAS – EFEITO DA CAL .....	87
FIGURA 37 – CORRELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE CAL E ABSORÇÃO.....	88
FIGURA 38 – RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO – EFEITO DA CAL.....	89
FIGURA 39 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – EFEITO DA CAL .....	90
FIGURA 40 – POROSIMETRIA DE MERCÚRIO – PASTILHAS ANTES DO ENSAIO ACCELERADO .....	91
FIGURA 41 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA AR+CALOR - EFEITO DA CAL .....	91
FIGURA 42 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA COPO – EFEITO DA CAL .....	92
FIGURA 43 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA POTE – EFEITO DA CAL .....	92
FIGURA 44 – RESULTADOS NA METODOLOGIA A+C .....	92
FIGURA 45 – RESULTADOS NA METODOLOGIA COPO.....	93
FIGURA 46 – RESULTADOS NA METODOLOGIA POTE .....	93
FIGURA 47 – RELAÇÃO TEOR DE CAL X EFLORESCÊNCIA – MÉTODO COPO	95
FIGURA 48 – RESULTADO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	97
FIGURA 49 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	98

FIGURA 50 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	99
FIGURA 51 – POROSIMETRIA DE MERCÚRIO – PASTILHAS ANTES DO ENSAIO ACELERADO .....	100
FIGURA 52 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA AR+CALOR – POZOLANAS .....	101
FIGURA 53 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA COPO – POZOLANAS .....	101
FIGURA 54 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA POTE – POZOLANAS .....	102
FIGURA 55 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA A+C – EFEITO DAS POZOLANAS .....	103
FIGURA 56 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA COPO – EFEITO DAS POZOLANAS .....	103
FIGURA 57 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA POTE – EFEITO DAS POZOLANAS .....	103
FIGURA 58 – PASTILHA APÓS RASPAGEM E MAIS 28 DIAS DE ENSAIO .....	106
FIGURA 59 – PASTILHA DA AMOSTRA DE REF PRATICAMENTE SECA .....	106
FIGURA 60 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NO ENSAIO ACELERADO EM DIFERENTES GRAUS DE HIDRATAÇÃO .....	108
FIGURA 61 – ÁREAS AFETADAS POR EFLORESCÊNCIA COM DIFERENTES PERÍODOS DE HIDRATAÇÃO ANTES DO ENSAIO ACELERADO .....	109
FIGURA 62 –CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE SÍLICA ATIVA E A QUANTIDADE DE EFLORESCÊNCIA FORMADA PARA CPS COM 7 E 91 DIAS DE HIDRATAÇÃO.....	110
FIGURA 63 –CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE CINZA VOLANTE E A QUANTIDADE DE EFLORESCÊNCIA FORMADA PARA CPS COM 7 E 91 DIAS DE HIDRATAÇÃO .....	110

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESUMO DOS ENSAIOS ACELERADOS DA LITERATURA.....	35
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND USADO.....	51
TABELA 3 – FLUORESCÊNCIA DE RAO-X DO CIMENTO .....	51
TABELA 4 – DADOS DO CLINQUER .....	52
TABELA 5 – FLUORESCÊNCIA DE RAO-X DA CAL HIDRATADA .....	52
TABELA 6 – FLUORESCÊNCIA DE RAO-X DAS ADIÇÕES MINERAIS .....	54
TABELA 7 – MASSA ESPECIFICA E FINURA DAS ADIÇÕES.....	54
TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO .....	56
TABELA 9 – TRAÇO UTILIZADO NO ESTUDO PRELIMINAR .....	58
TABELA 10 – RESUMO DAS METODOLOGIAS DE ENSAIO ACELERADO .....	63
TABELA 11 – TRAÇOS UTILIZADOS NA ETAPA FINAL.....	65
TABELA 12 – DENSIDADE E TEOR DE AR INCORPORADO.....	67
TABELA 13 – APLICAÇÃO DO MÉTODO ANOVA.....	79
TABELA 14 – APLICAÇÃO DA ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS .....	79
TABELA 15 – VALORES TEÓRICOS DE HIDRÓXIDO DE CALCIO.....	86
TABELA 16 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – ABSORÇÃO .....	88
TABELA 17 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – MÉTODO COPO .....	94
TABELA 18 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – ABSORÇÃO .....	97
TABELA 19 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – MÉTODO COPO .....	104
TABELA 20 – TABELA ANOVA – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE - CAL .....	129
TABELA 21 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO A+C - CAL .....	129
TABELA 22 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO COPO - CAL....	129
TABELA 23 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO POTE - CAL.....	129
TABELA 24 – TABELA ANOVA – ABSORÇÃO - POZOLANAS .....	130
TABELA 25 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO A+C – POZ.....	130
TABELA 26 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO COPO - POZ ...	130
TABELA 27 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA -MÉTODO POTE - POZ ....	130

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1. OBJETIVO .....	13
1.2. JUSTIFICATIVAS .....	14
<b>2. DEFINIÇÃO E MECANISMOS PARA FORMAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA</b>	<b>17</b>
2.1. DEFINIÇÕES .....	17
2.2. MECANISMO DE FORMAÇÃO .....	18
2.3. CLASSIFICAÇÃO DAS FLORESCÊNCIAS.....	21
2.4. EFEITO DA EFLORESCENCIA NA DURABILIDADE .....	22
2.5. MECANISMOS DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA .....	23
<b>3. INFLUÊNCIAS DO USO DE POZOLANAS .....</b>	<b>27</b>
3.1. REAÇÃO POZOLÂNICA.....	27
3.2. INFLUÊNCIA DA POZOLANA NA EFLORESCÊNCIA, LIXIVIAÇÃO E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	29
3.3. INFLUÊNCIA DA POZOLANA NA POROSIDADE E PERMEABILIDADE.....	32
<b>4. ENSAIOS ACELERADOS E ANÁLISE GRÁFICA .....</b>	<b>34</b>
4.1. ENSAIOS ACELERADOS PARA FORMAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA .....	34
4.2. ANÁLISE GRÁFICA PARA QUANTIFICAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA.....	44
<b>5. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>49</b>
5.1. MATERIAIS .....	51
5.1.1. Aglomerantes.....	51
5.1.2. Adições Minerais .....	53
5.1.3. Agregado miúdo .....	55
5.1.4. Água e pó xadrez.....	57
5.2. EXPERIMENTOS .....	57
5.2.1. Estudo Preliminar .....	58
5.2.2. Estudo principal .....	64

<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
6.1.	ENSAIO PRELIMINAR .....	76
6.2.	TERMOGRAVIOMETRIAS (TGA) .....	81
6.3.	DIFRAÇÃO DE RAIO-X (DRX) .....	83
6.4.	ESTUDO PRINCIPAL .....	84
6.4.1.	Efeito da dosagem de cal .....	86
6.4.2.	Efeito da dosagem de pozolana .....	96
6.4.3.	Impacto da duração do ensaio acelerado .....	105
6.4.4.	Impacto do grau de hidratação para início do ensaio .....	107
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>111</b>
	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>114</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>129</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de argamassa como forma de revestimento externo é muito comum no Brasil. Tendo este fato, aliado a falta de manutenção e as constantes chuvas que ocorrem na região de Curitiba, ocorre uma grande incidência de eflorescências nas fachadas das edificações existentes nesta cidade. Marcondes e Moreira (2016), por exemplo, perceberam que mais de 75% das fachadas de prédios com altura superior a 5 pavimentos na região do Batel em Curitiba apresentavam eflorescências.

A eflorescência é uma manifestação patológica decorrente de depósitos salinos, principalmente de metais alcalinos (sódio e potássio) ou alcalino-ferrosos (cálcio e magnésio) na superfície da estrutura ou revestimento. Estes sais são provenientes, ou da lixiviação de sais solúveis presentes nos materiais utilizados, como cimento ou tijolo, ou originados do meio, como do solo ou água salina, por exemplo. O carreamento destes materiais para superfície ocorre por meio da água, proveniente de uma infiltração ou falta de estanqueidade adequada. (BAUER, 2009)

As estruturas cimentícia em geral estão sujeitas a diversos tipos de manifestações patológicas que podem comprometer sua conservação e durabilidade, sendo a eflorescência uma das manifestações patológicas mais comuns. (CULTRONE E SEBASTICAN, 2008). A Figura 1 exemplifica o aparecimento de eflorescência em vigas de garagem. Padaratz *et al.* (2002), por exemplo, analisaram as manifestações patológicas existentes em um prédio na cidade de Maringá e constataram que a eflorescência correspondeu a mais de 15% do total das manifestações observadas, sendo somente inferior a fissuração, que possuiu uma proporção de pouco mais de 20%. Dorea *et al.* (2010), por sua vez, estudaram um prédio em Sergipe datado de 1914 e observaram que mais de 75% das paredes apresentavam eflorescência.

Alguns autores já estudaram a mitigação do aparecimento desta manifestação patológica com o uso de pozolanas. Weng *et al.* (2013), por exemplo, perceberam que a adição de pozolana (metacaulim) reduziu a incidência de eflorescências em argamassas por criar uma matriz mais densa e consumir hidróxido de cálcio. Entretanto, as pesquisas encontradas que correlacionaram o uso de uma pozolana com a redução da eflorescência utilizaram somente traços de argamassa sem cal



(DELAIR *et al.*, 2007; WENG *et al.*, 2013; WEI e SUTAN, 2013). Considerando que no Brasil a utilização de argamassas mistas para reboco é extremamente comum e pelo fato da cal ser uma fonte adicional de hidróxido de cálcio, se torna importante saber se a utilização de uma adição pozolânica teria o mesmo efeito mitigador em argamassas com cal do que em argamassas simples de cimento. Além disso, é importante também a avaliação do efeito do uso da cal em traços sem adições pozolânicas na incidência de eflorescência. Estas informações podem facilitar a realização de recomendações com foco em mitigar a ocorrência deste problema.

FIGURA 1 - EFLORESCÊNCIA EM VIGAS DE GARAGEM



FONTE: Santos e Silva Filho, 2008

### 1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal determinar o efeito da substituição parcial de cimento por pozolanas (sílica ativa e cinza volante) e também da dosagem de cal hidratada sobre a incidência de eflorescência em argamassas, por meio de ensaios acelerados.

Como objetivos secundários, esta dissertação tem ainda como foco determinar qual a melhor metodologia de ensaio acelerado para geração de eflorescência, bem como qual o efeito do tempo de cura antes do ensaio acelerado e da duração deste ensaio acelerado na aparição da manifestação patológica.

## 1.2. JUSTIFICATIVAS

Manifestações patológicas geralmente levam a necessidade de reparos e por consequência, a novos consumos de materiais. O aparecimento de eflorescência, por exemplo, pode levar a necessidade de repintura, ou ainda, em casos extremos, da retirada e reaplicação da argamassa. Helene e Pereira (2007) citam que apesar de a eflorescência ter como maior prejuízo o impacto estético, ela indica a incidência de uma lixiviação da estrutura cimentícia, a qual pode levar ao aumento da porosidade e redução da resistência mecânica, contribuindo negativamente para a durabilidade da estrutura.

Segundo Mahayuddin e Zaharuddin (2013), a indústria da Construção Civil é a maior consumidora de recursos naturais, correspondendo a cerca 75% do total, e uma das maiores poluidoras em termos de geração de resíduo. As argamassas sozinhas correspondem a mais de 60% destes rejeitos gerados. O mesmo potencial poluidor foi observado pelo Conselho de Construção Verde dos Estados Unidos (USGBC), o qual levantou em 2014 que a emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da indústria da construção corresponde a mais de 39% da emissão total, superando transportes. O UNEP (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), no ano de 2016, também comentou que a indústria da construção consome mais de 45% da energia total gerada no mundo, contribuindo significativamente para a emissão de CO<sub>2</sub>.

Apesar de a Construção Civil e, principalmente, a indústria do cimento produzirem grande quantidade de CO<sub>2</sub>, Possan, Fogaça e Pazuch (2012) comentam que estruturas de concreto e argamassa tem a capacidade de recapturar parte do CO<sub>2</sub> inicialmente emitido. Isso ocorre basicamente pela reação de carbonatação, ou seja, reação do hidróxido de cálcio do cimento com o dióxido de carbono, formando novamente carbonato de cálcio. Entretanto, esta captura não consegue reabsorver todo o CO<sub>2</sub> gerado (PEDE e GUIMARÃES, 2007).

Além do impacto ambiental produzido por um eventual reparo com rejeitos e consumos de novos materiais, há também prejuízos econômicos. Helene (1993), por exemplo, comenta que o custo se eleva exponencialmente entre se prever uma solução adequada já na fase de projeto e precisar fazer uma manutenção corretiva posteriormente. Além disso, o revestimento, tanto interno, como externo, corresponde

ao maior custo da construção de uma edificação (RIBEIRO,2015). É exatamente esta parcela que é afetada pela eflorescência. Uma necessidade de reparo no revestimento devido a esta manifestação patológica gera uma representatividade ainda maior desta atividade.

Outro ponto relevante para realização deste trabalho é a questão social. Segundo a Fundação João Pinheiro (FJP), em seu relatório de 2016, o Brasil apresentava em 2014 um déficit habitacional de cerca de 6 milhões de moradias. Além disso, 83% deste déficit está em famílias que recebem até 3 salários mínimos. Usualmente estas famílias veem a compra da casa própria como um sonho a ser realizado e o aparecimento de manifestações patológicas, além de gerar uma frustração, implica também em custos de reparos relativamente elevados para estas famílias.

Apesar de, segundo a NBR 15575:2013, as construtoras serem responsáveis por até 50 anos pela estrutura e 40 anos pelo sistema de vedação, algumas construtoras não cumprem este prazo e levam moradores a precisarem recorrer judicialmente para conseguirem reparos. Nakamura (2012) comenta que apesar de a Caixa Econômica Federal não divulgar exatamente o número de obras do programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV) com vícios construtivos, sabe-se que este problema ocorre em diversas cidades do país. No interior de São Paulo, por exemplo, a presença de manifestações patológicas em casas do programa MCMV motivou o Ministério Público Federal a entrar com uma ação contra uma construtora e a própria Caixa Econômica Federal para exigir intervenções. Após este fato, diversas outras prefeituras realizaram o mesmo. Entretanto, Nakamura (2012) comenta ainda que este tipo de problema não é exclusividade de obras do programa e que também ocorrem em obras particulares.

Além deste desgaste causado aos moradores, as próprias construtoras também são prejudicadas com a existência de manifestações patológicas, uma vez que precisam arcar com custos de reparo e podem ter sua imagem perante o mercado comprometida. Para o caso do programa MCMV, o governo, por meio da Caixa Econômica Federal, também pode ser co-responsabilizado (NAKAMURA, 2012).

Vale também ressaltar que praticamente todas as obras atuais utilizam algum tipo de argamassa como forma de revestimento. O conhecimento das principais

variáveis que impactam na ocorrência de eflorescência se faz necessário para que seja possível prevenir efetivamente o aparecimento desta manifestação patológica nestas obras, fazendo com que haja menores custos com manutenções e reparos, menor geração de resíduo, redução do consumo de novos materiais e menores desgastes para moradores, construtoras e, até mesmo, governo.

Mediante todas as informações que serão discutidas na revisão bibliográfica deste trabalho, percebe-se que não há um consenso, nem sobre a melhor metodologia para estudar o aparecimento da eflorescência por meio de um ensaio acelerado, nem como interpretar os resultados destes ensaios, o que sugere que novos estudos sejam necessários a fim de comparar diferentes metodologias e conseguir uma padronização. Pode-se perceber ainda a relevância do tema, visto a quantidade de estudos recentes. Contudo, nota-se que na maioria dos estudos encontrados foram utilizados traços de argamassa sem a utilização de cal. Além disso, exceto por Ritchie (1955), nenhum outro autor estudado comparou o efeito de diferentes teores de cal sobre o aparecimento da eflorescência, muito menos, procurou correlacionar o uso da cal concomitantemente com a substituição de cimento por adições pozolânicas, como maneira de mitigar a ocorrência desta manifestação patológica. Por estas razões, percebe-se a importância deste trabalho para o meio acadêmico.

## 2. DEFINIÇÃO E MECANISMOS PARA FORMAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA

### 2.1. DEFINIÇÕES

Eflorescências são depósitos cristalinos de cor branca que surgem na superfície da estrutura cimentícia, devido ao transporte e posterior evaporação de soluções aquosas salinizadas (SANTOS e SILVA FILHO, 2008). A Figura 2 exemplifica um caso extremo de eflorescência onde houve lixiviação do hidróxido de cálcio, com posterior conversão deste para carbonato de cálcio, e sua deposição formando estalactites

FIGURA 2 – LIXIVIAÇÃO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO COM FORMAÇÃO DE ESTALACTITES NO METRÔ DE CARACAS



FONTE: Helene e Pereira, 2007

Os sais causadores da eflorescência podem ser de diversos tipos, como metais alcalinos (sódio e potássio) ou alcalinos-ferrosos (cálcio e magnésio), solúveis ou parcialmente solúveis em água. Estes sais podem ter origem nos próprios materiais de dosagem (cimento e areia) ou serem provenientes do meio, como névoa salina, por exemplo (GRANATO, 2005). Além disso, os sais já podem estar presentes na solução na sua forma final, como o NaCl, ou serem gradualmente formados pela

reação de algum composto da solução com o dióxido de carbono do ar, como é o caso do hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio (HELENE e PEREIRA, 2007).

Um fator indispensável para que ocorra a eflorescência é a presença de água, a qual pode ter diversas origens, como a utilizada para o amassamento, ou ainda ser proveniente de chuvas ou da própria umidade do solo. Esta água dissolve os sais e os transportam para a superfície. A evaporação desta solução salina faz com que haja uma supersaturação de sais e, conseqüentemente, ocorra a deposição destes na superfície do material (GRANATO, 2005)

Para Uemoto (1988), o fenômeno da eflorescência pode ocorrer em qualquer elemento da edificação e pode gerar prejuízos meramente estéticas ou ser o indicativo de um ataque mais agressivo. No primeiro caso há somente a formação de manchas esbranquiçadas na superfície do material e que simplesmente causam um desconforto visual. Entretanto, dependendo da localização da formação dos cristais e do tipo de íons envolvidos, podem ainda ocorrer fissurações por formação excessiva de sais em poros próximos à superfície, ou ainda o comprometimento da matriz cimentícia devido a uma redução muito significativa do pH, gerando uma desestabilização dos cristais de C-S-H. Helene e Pereira (2007) comentam que um concreto tendo cerca de um quarto do seu conteúdo original de cálcio lixiviado, perde cerca de metade da sua resistência à compressão devido a esta redução da quantidade de C-S-H.

## 2.2. MECANISMO DE FORMAÇÃO

O carbonato de cálcio é um dos sais predominantes nas eflorescências encontradas em materiais que utilizam o cimento Portland como aglomerante principal. A reação para formação desta eflorescência a base carbonato de cálcio é secundária, visto que primeiramente é necessária a formação de hidróxido de cálcio pela hidratação do cimento. Conforme pode ser visto pelas Equações 1 e 2, a reação dos silicatos presentes no cimento ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), principais responsáveis pela resistência da matriz cimentícia, formam cristais de C-S-H e liberam hidróxido de cálcio na solução (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

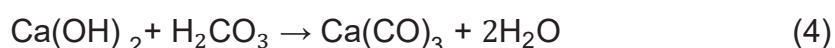






É relevante ainda observar que aproximadamente 75% dos compostos anidros do cimento são silicatos, sendo que o  $\text{C}_3\text{S}$  normalmente corresponde de 45 a 60% e o  $\text{C}_2\text{S}$  de 15 a 30%. O  $\text{C}_3\text{S}$  produz cerca de 39% de hidróxido de cálcio, enquanto o  $\text{C}_2\text{S}$  produz 18%. No final da reação, o hidróxido de cálcio corresponde a cerca de 25% do produto total formado na reação do cimento Portland. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A eflorescência ocorre quando este hidróxido de cálcio presente nos poros da matriz cimentícia se dissolve em água. Havendo evaporação desta água, o hidróxido de cálcio dissolvido é trazido para a superfície onde entra em contato com o ácido carbônico, proveniente da dissolução do gás carbônico do ar em água. A carbonatação ocorre posteriormente como uma reação de neutralização entre o hidróxido de cálcio e o ácido carbônico, formando carbonato de cálcio, um sal praticamente insolúvel e que dificilmente é removido pela ação de intemperes. Quando se atinge a solubilidade limite do carbonato de cálcio em água, ocorre a precipitação de qualquer sal adicional formado. A superação deste nível de solubilidade ocorre por maior formação de sal do que a solubilidade limite ou pela evaporação do solvente (água). Estas reações são descritas nas Equações 3 e 4 (ABERLE *et al.*, 2007).



Outra forma de eflorescência é a proveniente do sulfato de cálcio (gesso) que é utilizado no cimento como forma de controle de pega. Inicialmente este composto reage com o  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento formando primeiramente etringita e, posteriormente, monossulfato. Estes dois produtos são insolúveis em condições normais e não tendem a formar eflorescência. Entretanto, com a carbonatação e, conseqüentemente, com a redução do pH, ocorre a decomposição destes elementos novamente em gesso e outros compostos. O monossulfato é mais instável e mais propenso a este fenômeno de decomposição do que a etringita. Entretanto, o fenômeno de carbonatação é lento em condições normais, avançando normalmente de 0,06 a 1,2 mm por ano (CHWAST *et al.*, 2015).

Entretanto, as eflorescências a base de sulfato, principalmente em estruturas novas, normalmente são originadas por contaminações do bloco cerâmico utilizado na alvenaria ou de fontes externas, como o solo (MELANDER, 1993). Além disso, sais a base de sulfato costumam ser solúveis, o que faz com que sejam posteriormente lixiviados, não causando impacto estético tão significativo, exceto pelo sulfato de cálcio que é parcialmente insolúvel e pode demandar mais de um ano para desaparecer (BROCKEN e NIJILAND, 2004).

As eflorescências de origens externas normalmente ocorrem quando há contato da estrutura com a água do mar, esgoto ou solo contaminado que contenha álcalis, cloretos ou sulfatos. Normalmente, nestes casos, a eflorescência deixa de ser um problema meramente estético e pode ocorrer comprometimento da estabilidade da matriz cimentícia, principalmente quando se envolve o contato com sulfato de magnésio (UEMOTO, 1988).

Na eflorescência, a quantidade de sais depositados depende da concentração original de sais na solução e do número de ciclos de molhagem e secagem que a peça estrutural venha a sofrer. Quanto maior for a concentração de sais na solução ou maior for o número de ciclos, maior tende a ser a deposição de cristais (BINDA e BARONIO<sup>1</sup> *apud* SALLES, 2010).

A eflorescência necessita simultaneamente de três fatores para ocorrer: presença de sais ou componentes solúveis; presença de água em quantidade suficiente para dissolver estes sais; e condução e evaporação desta água. Caso um dos fatores não exista, não há formação da manifestação patológica. Além disso, a capacidade da água de solubilizar estes sais também interfere no processo. Águas puras, provenientes de névoa, chuva ou degelo, são as mais perigosas por não conterem cálcio dissolvido, sendo, por esta razão, mais propensas a dissolverem os compostos da pasta. Outro fator relevante é a temperatura. Quanto maior for esta, menor tende a ser a deposição de sais, visto que a solubilidade do hidróxido de cálcio decresce com o incremento da temperatura. (HELENE E PEREIRA, 2007)

---

<sup>1</sup> BINDA, L., BARONIO, G. Mechanisms of masonry decay due to salt crystallization. *Durability of Building Materials*, n. 4, p. 227-240, 1986.

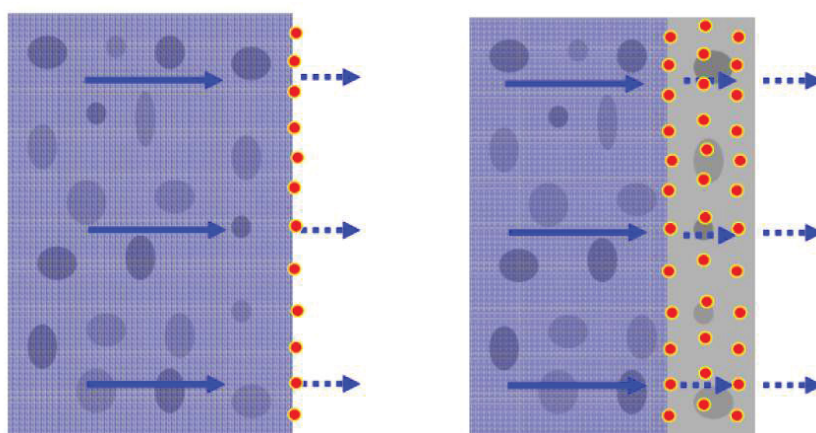
### 2.3. CLASSIFICAÇÃO DAS FLORESCÊNCIAS

No que se refere a classificação da eflorescência, Verduch e Solana (2000) comentam que a eflorescência faz parte de um grupo maior chamado “florescências” e que, dependendo do local de formação, recebem diferentes nomenclaturas:

- a) Subeflorescências ou criptoflorescências: não são visíveis e se caracterizam por cristalizações de sais sob a superfície da peça, nos seus poros ou redes capilares, podendo ocasionar danos a sua durabilidade devido a forças de expansões geradas.
- b) Eflorescências: são visíveis e ocasionadas quando há a cristalização na superfície dos elementos. Normalmente o impacto maior é de cunho estético, a não ser quando há uma severa carbonatação a ponto de se reduzir consideravelmente o pH da estrutura.

Para a ocorrência de eflorescências é necessário que os poros da matriz cimentícia estejam completamente cheios de água, para que quando ocorrer a formação de sais, seguida da evaporação da água, estes sais se depositem na superfície da peça. Caso contrário, eles se depositarão no seu interior, formando as subeflorescências, como pode ser observado na Figura 3. (KRESSE, 1987)

FIGURA 3 – FORMAÇÃO DE EFLORESCÊNCIA (ESQUERDA) E SUBEFLORESCÊNCIA (DIREITA)



Fonte: Gonçalves, 2007

## 2.4. EFEITO DA EFLORESCENCIA NA DURABILIDADE

Como comentado anteriormente, a eflorescência ocorre basicamente pela lixiviação de sais de dentro da matriz cimentícia, principalmente do hidróxido de cálcio, seguido de sua carbonatação. Este fenômeno pode ocorrer na superfície da estrutura cimentícia, resultando em eflorescências, ou no seu interior, gerando criptoflorescências.

A lixiviação da Portlandita ocorre com maior facilidade do que a dissolução e posterior lixiviação do cálcio presente nos cristais de C-S-H. Por esta razão, a Portlandita é a principal fonte de cálcio nas eflorescências. A dissolução do C-S-H normalmente ocorre em casos de grande redução do pH, quando praticamente toda a Portlandita já foi lixiviada (CHOI e YANG, 2013).

Esta lixiviação de cálcio da matriz cimentícia, principalmente na forma de hidróxido de cálcio, tende a causar aumentos do diâmetro médio dos poros devido ao tamanho do seu cristal, levando a uma maior permeabilidade. Além disso, pode ainda haver um impacto significativo na resistência à compressão, chegando a comprometer mais de 50% do seu valor em casos onde a lixiviação é severa a ponto de desestabilizar os cristais de C-S-H. Nos casos em que somente a Portlandita é lixiviada, reduções de resistência à compressão na ordem de 15 a 20% podem ocorrer devido a um aumento da porosidade da estrutura cimentícia (CARDE e FRANÇOIS, 1997; ULM *et al.*, 2001; AGOSTINI *et al.*, 2007; CHOI e YANG, 2013). Entretanto, nota-se que a absorção da peça lixiviada tende a ser inferior à da peça sã. Isso acontece devido a um tamponamento dos poros pelos cristais formados pela carbonatação dos óxidos de cálcio lixiviados (CHENG *et al.*, 2013). Esta carbonatação faz também com que a resistência superficial desta estrutura cimentícia aumente.

Outro ponto relevante é que a utilização de adições pozolânicas, como sílica ativa e cinza volante, tendem a reduzir a perda de resistência originada pela lixiviação. Isso se deve ao fato de que a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio, formando cristais C-S-H, os quais são mais resistentes à lixiviação, além da pozolana também agir reduzindo o diâmetro médio dos poros (ZELIC *et al.*, 1999; CHENG *et al.*, 2013).

Um outro fator que pode comprometer a durabilidade da estrutura cimentícia é a formação de criptoflorescências, ou seja, a cristalização dos sais no interior dos poros, e não na superfície. A formação destes cristais nos poros da estrutura cimentícia geram esforços de tração, os quais podem ser superiores a resistência da matriz cimentícia e gerar a sua fissuração, comprometendo a sua durabilidade (ZEHNDER e ARNALD, 1989).

## 2.5. MECANISMOS DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA

O transporte de agentes agressivos no interior da estrutura cimentícia é regido por diversos fenômenos físico-químicos e que, por sua vez, dependem de diversas variáveis, como o grau de saturação dos poros, a umidade relativa, a existência de fissuração, a estrutura porosa e a interconexão dos poros. De uma forma geral, estes fatores levam a diversos mecanismos de transporte, dentre eles a permeabilidade, a absorção e a difusão, sendo que estes mecanismos podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente (HELENE, 1993; SILVA, 2011).

A porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total, ou seja, proporção do volume total da argamassa que é ocupada pelos poros, sendo expressa em porcentagem. É exatamente esta propriedade, junto com a conexão destes poros, os fatores mais importantes para explicar os mecanismos pelos quais a água pode percolar na estrutura cimentícia (CASCUDO, 1997). A relação a/c e o grau de hidratação da pasta são os principais responsáveis pela porosidade. Quanto maior a relação a/c, maior tende a ser a porosidade, e quanto mais avançada a hidratação do cimento, menor será esta (METHA e MONTEIRO, 2014)

Segundo Silva (2011), o mecanismo mais comum de transporte dentro da matriz cimentícia é a absorção capilar, seguido pela difusão e pela permeabilidade. No caso de estruturas cimentícia com saturação completa, a permeabilidade tende a ser o fator dominante de transporte de água. Entretanto, como a estrutura raramente se encontra completamente saturada, a absorção capilar se torna o mecanismo principal (HALL e YAU, 1987). Isto ocorre, por exemplo, quando há evaporação em

um dos lados da estrutura, não permitindo a sua completa saturação e intensificando a ação da absorção capilar (AUDENAERT, 2006).

Segundo Medeiros e Helene (2008), a difusão pode ser definida como o transporte de íons através de uma solução, com fluxo de uma região de alta concentração para outra de baixa. Para a formação das eflorescências, a difusão é a responsável pela locomoção do gás carbônico do ar para dentro da água de poros, formando ácido carbônico, o qual posteriormente é neutralizado pelo hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio.

No transporte do hidróxido de cálcio do interior da estrutura cimentícia para a superfície atuam somente os mecanismos de permeabilidade e capilaridade. A seguir serão melhor explicados estes dois fenômenos:

#### a) Permeabilidade

Permeabilidade pode ser definida como a facilidade que um fluido tem, seja ele líquido ou gás, de penetrar e se movimentar pela matriz cimentícia, em presença de uma pressão diferencial (SILVA, 2011). A permeabilidade é função da estrutura de poros do material, a qual depende do traço utilizado, condição de cura e presença de danos físicos, químicos e mecânicos. Entretanto, não existe uma correlação direta entre porosidade e permeabilidade (BARRET e GLASSER, 1992).

Os poros da estrutura cimentícia podem estar interconectados ou não. Caso não haja interconexão, a permeabilidade não é afetada. Um exemplo disso é a utilização de aditivos incorporadores de ar, os quais costumam aumentar a porosidade da argamassa, mas não sua permeabilidade, pois criam internamente pequenas bolhas de ar isoladas e não interconectadas. Os poros capilares são os maiores responsáveis pela permeabilidade, por serem interconectados e terem um diâmetro que facilita a permeabilidade (CASCUDO, 1997).

No caso de estruturas cimentícia, são diversos os fatores que podem interferir na permeabilidade do material. Reduções na relação a/c, por exemplo, tendem a diminuir a quantidade de poros interconectados e, conseqüentemente, reduzir a permeabilidade da estrutura cimentícia, além de também gerar uma menor



segregação e exsudação (KOSMATKA *et al.*, 2008; SHAMSAI *et al.*, 2012). Uma cura adequada permite que o cimento se hidrate corretamente e, com isso, consiga formar uma estrutura mais densa (DHIR, HEWLETT e CHAN, 1989). Além disso, uma estrutura cimentícia com menor idade possui uma maior permeabilidade, a qual se reduz naturalmente com o decorrer da hidratação (WINSLOW e LIU, 1990). A presença de agregados também afeta a permeabilidade frente a pasta, visto que há a presença da zona de transição (WINSLOW *et al.* 1994; HALAMICOVA *et al.* 1995).

Vários estudos já foram realizados a respeito da utilização de adições em concretos e argamassas e seu efeito na permeabilidade destes materiais. De uma forma geral, os autores perceberam que a utilização de adições pozolânicas cria uma microestrutura mais densa, seja pelo efeito filer destas adições, ou mesmo pelo consumo de hidróxido de cálcio, formando novos cristais de C-S-H, fato que reduz a permeabilidade (YIGITER *et al.*, 2007; SONG *et al.*, 2010). Também já se notou um efeito positivo sob a redução da permeabilidade mesmo com a utilização de adições não reativas, como filer calcário, por gerar um melhor empacotamento e densificação da estrutura cimentícia (TSIVILIS *et al.*, 2003).

#### b) Absorção Capilar

A absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e que consiste na ascensão de água através dos poros capilares devido à tensão superficial e a adsorção das moléculas da água na superfície interna dos poros (SILVA, 2011). De acordo com Helene (1993), a absorção capilar é significativa em poros na faixa de 0,1  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ , chamados poros capilares.

A absorção capilar interfere no coeficiente de permeabilidade do material. Entretanto, diferentemente da definição de permeabilidade apresentada anteriormente, não depende de um gradiente de pressão. A força da absorção capilar depende da tensão superficial, viscosidade e densidade do líquido, do ângulo de contato e do diâmetro do poro. No caso da matriz cimentícia, o ângulo de contato é pequeno, devido a característica hidrofílica do material. Por esta razão, há a formação

de um menisco convexo, ou seja, com tendência ascendente, indicando tendência de molhar o material (CERNY e ROVNANIKOVA, 2002).

A absorção capilar é um parâmetro extremamente difícil de ser controlado em uma estrutura cimentícia devido à sua característica hidrofílica. Em tese, quanto menores os poros, maiores as pressões capilares e, portanto, maior a altura de ascensão. Entretanto, menor é a velocidade da ascensão da água, devido ao aumento da fricção entre fluido e substrato. Por outro lado, quanto maiores os poros, mais água é capaz de ser absorvida para uma mesma altura de ascensão (HELENE, 1993).

Assim como para a permeabilidade, a interconexão dos poros apresenta um papel mais importante que seu diâmetro e é exatamente esta a variável a ser manipulada para reduzir a absorção (HELENE, 1993). Por esta razão, o uso de pozolanas, por exemplo, também consegue reduzir a taxa de absorção capilar (REGATTIERI *et al.*, 1996; LOPES *et al.*, 1999), da mesma forma que reduções na relação a/c e aumento do grau de hidratação (VIEIRA *et al.* 2000).

### 3. INFLUÊNCIAS DO USO DE POZOLANAS

A NBR 12653 (2014) define pozolona como sendo um material silicoso ou silicoaluminoso que possui isoladamente pouco ou nenhum poder aglomerante, mas que finamente moído e em presença de água, reage com o hidróxido de cálcio formando componentes com poder cimentício. Esta reação química entre o componente alumino-silicoso e o hidróxido de cálcio é chamada de reação pozolânica.

Existem dois tipos básicos de pozolana: as naturais e as artificiais. As pozolanas naturais mais encontradas são a cinza vulcânica e a argila calcinada. Já as pozolanas artificiais, incluem as cinzas volantes, provenientes da queima de carvão e a sílica ativa, proveniente da produção de ferro silício ou silício metálico. Destas, a cinza volante é a mais utilizada como adição no cimento, principalmente em países que operam com matrizes termoeletricas (NEVILLE, 2016).

As adições são utilizadas nos cimentos por diversas razões, desde a necessidade de se reduzir o acúmulo de rejeitos e o consumo de energia, até melhorar algumas propriedades do próprio cimento, como reduzir o calor de hidratação, aumentar a durabilidade e a resistência mecânica (TAYLOR, 1997).

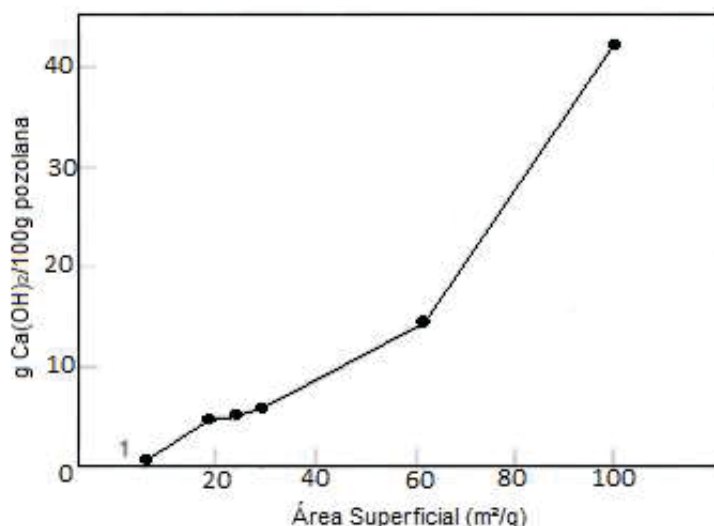
#### 3.1. REAÇÃO POZOLÂNICA

Materiais pozolânicos são ricos em  $\text{SiO}_2$  e geralmente possuem uma baixa quantidade de  $\text{CaO}$ . Para que ocorra a reação destas pozolanas em presença de água, há a necessidade de uma fonte externa de  $\text{CaO}$ , a qual, no caso do cimento, é a reação de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e do  $\text{C}_2\text{S}$  (TAYLOR, 1997).

A razão pela qual a pozolana deve ser finamente moída é que caso contrário, a sílica desta não consegue se combinar satisfatoriamente com o hidróxido de cálcio, não ocorrendo a reação com a velocidade necessária. Isso pode ser visto na Figura 4, onde quanto mais fina é a pozolana, maior é a quantidade de hidróxido de cálcio consumida por esta. Além disso, é de suma importância que a sílica seja do tipo vítrea (amorfa), visto que a sílica cristalina possui baixíssima reatividade. Portanto,

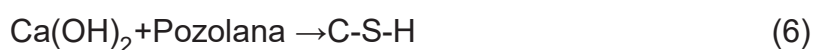
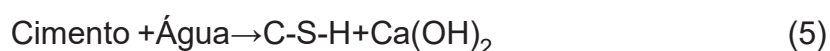
a quantidade de hidróxido de cálcio que uma pozolana pode absorver dependente de fatores como: a quantidade de sílica amorfa, o tempo de cura, área superficial da pozolana, relação a/c, temperatura, dentre outros (TAYLOR, 1997; NEVILLE, 2016)

FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE BLAINE E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO DE POZOLANAS COM DIFERENTES FINURAS



FONTE: Adaptado de Taylor (1997)

Como comentado anteriormente, quando o cimento reage com a água, dois componentes principais são formados: C-S-H e hidróxido de cálcio. Entretanto, estando uma pozolana presente, esta reage com o hidróxido de cálcio, gerado a partir da reação dos silicatos, formando novos cristais de C-S-H, conforme as Equações simplificadas 5 e 6 (DODSON, 1990):



Ainda existem incertezas sobre a cinética da reação pozolânica. Sabe-se, por exemplo, que a finura e a composição química representam uma variável importante, mas ainda é incerto como estes fatores interferem exatamente na reação. Um exemplo disso são especulações existentes de que além de reagir com o hidróxido de cálcio, a pozolana também apresenta reações com o C<sub>3</sub>A ou com seus produtos de reação (etringita/monossulfato) (NEVILLE, 2016).

Dodson (1990) apresentou um cálculo simplificado demonstrando que aproximadamente 13 kg de  $\text{Ca(OH)}_2$  é produzido quando 45 kg de cimento se hidrata (assumindo 52% de  $\text{C}_3\text{S}$  e 20% de  $\text{C}_2\text{S}$ ). Neste exemplo ilustrativo, adicionando-se 18 kg de pozolana contendo 40% de sílica reativa, todo o hidróxido de cálcio gerado seria completamente consumido, conforme Equação 7.



Mehta e Monteiro (2014) citam que a adição de pozolana ao cimento/concreto traz diversas vantagens, como, por exemplo:

- Consumo do hidróxido de cálcio da reação do cimento que poderia ser lixiviado e, conseqüentemente, ter originado a eflorescências;
- Aumento da resistência ao sulfato, por se ter menos hidróxido de cálcio;
- Os produtos da reação pozolânica conseguem preencher os vazios capilares, melhorando a resistência, densidade e impermeabilidade do sistema, além de dificultar a entrada de agentes agressivos, melhorando a durabilidade.

### 3.2. INFLUÊNCIA DA POZOLANA NA EFLORESCÊNCIA, LIXIVIAÇÃO E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

Alguns autores estudaram a utilização da pozolana (metacaulim) para mitigar o aparecimento de eflorescências. Weng *et al.* (2013) testaram dosagens de metacaulim variando de 5 a 25% e perceberam que a quantidade que gerou menos eflorescência foi a de 15%. Com dosagens superiores, notaram a existência de metacaulim sem reação no final do estudo, indicando possivelmente uma falta de hidróxido de cálcio ou de água para completar a reação. O mesmo foi observado por Delair (2007), contudo, este notou diminuição da eflorescência até a dosagem de 30%. Estas reduções podem ser explicadas pela capacidade do metacaulim de consumir hidróxido de cálcio. Diversos outros autores notaram esta redução da quantidade de hidróxido de cálcio com a substituição de cimento por metacaulim, chegando a haver o consumo total da portlandita com 30% de substituição após 90 dias de idade (GRUBER *et al.*, 2001; KHATER, 2010; ANTONI *et al.*, 2012).

A substituição de cimento por sílica ativa também apresenta grande potencial na redução da quantidade de hidróxido de cálcio, chegando a reduzir 80% da portlandita com uma substituição de 20% da quantidade do cimento e 50% com uma dosagem de 10% (SAITO e DEGUSHI, 2000; TRNÍK *et al.*, 2017). Além disso, a utilização de sílica ativa se mostra efetiva para reduzir a lixiviação em caso de contato com fluxo de água. Isto ocorre devido ao principal material lixiviável ser a portlandita, visto que a dissolução dos cristais de C-S-H ocorre somente em casos extremos. Desta maneira, há uma menor perda de resistência e menor aumento da porosidade após a lixiviação (CAEDE e FRANÇOIS, 1999; SAITO e DEGUSHI, 2000).

Em termos comparativos do potencial de consumo de hidróxido de cálcio por diferentes pozolanas, nota-se que a sílica ativa tende a causar uma redução superior de portlandita que o metacaulim para uma mesma dosagem, como pode ser visto na Figura 5 (MEDEIROS *et al.*, 2017a). Já a cinza volante apresenta um potencial inferior ao do metacaulim, conforme foi observado por Dojkov *et al.* (2013). Estes autores perceberam que em 20 dias, 90% do hidróxido de cálcio havia sido consumido pelo metacaulim, enquanto houve uma redução de apenas 30% com o uso da cinza volante. Quarcioni *et al.* (2015) também notaram que o metacaulim e a sílica ativa consumiram uma quantidade muito superior de hidróxido de cálcio do que a cinza volante. Além disso, observa-se ainda que a reação da sílica ativa ocorre de forma muito mais rápida que a cinza volante. Enquanto a última pode demorar ao menos 7 dias para começar a apresentar consumos de hidróxido de cálcio, a sílica ativa já gera este efeito a partir de 12h de hidratação (WENG *et al.*, 1997).

Percebe-se ainda que a substituição de cimento pela adição pozolânica tende a trazer um efeito ainda mais significativo na redução da quantidade de hidróxido de cálcio do que a simples adição suplementar deste material, sem alterar o teor de cimento, conforme pode ser visto na Figura 6 (MEDEIROS *et al.*, 2017b). Isso ocorre devido ao fato de que se realizando a substituição do cimento pela adição, se reduz também a fonte primária de hidróxido de cálcio (clínquer).



FIGURA 5 – PICO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

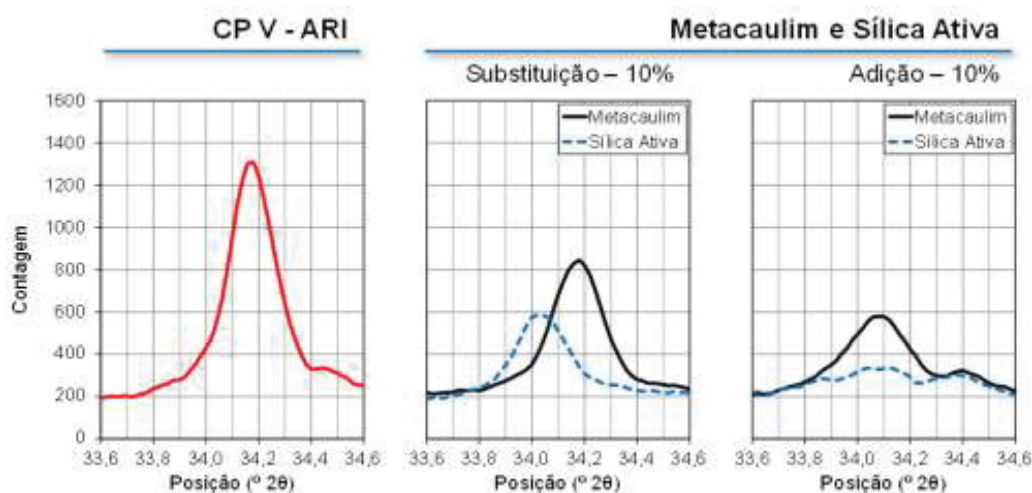
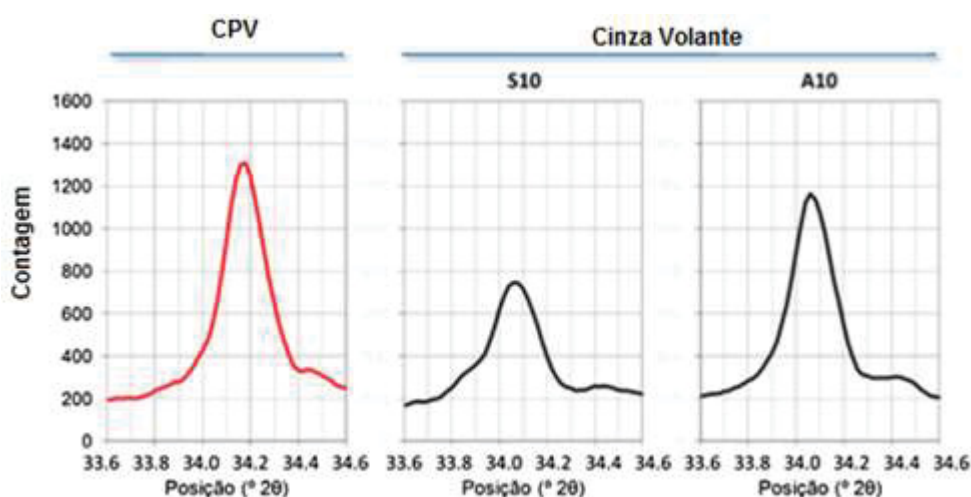
FONTE: Medeiros *et al.*, 2017a

FIGURA 6 – PICO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO COM SUBSTITUIÇÃO (S10) E ADIÇÃO (A10) DE CIMENTO POR 10% DE CINZA VOLANTE

FONTE: Adaptado de Medeiros *et al.*, 2017b

Alguns autores (WENG *et al.*, 1997; LAM *et al.*, 2000; BAERT *et al.*, 2008; DESCHNER *et al.*, 2012) notaram ainda que o pico da quantidade de portlandita ocorre normalmente entre 7 e 14 dias e somente após este prazo é que se inicia a redução desta quantidade pela reação pozolânica da cinza volante. Durante este período inicial, a pozolana age somente como filer e ponto de nucleação. Esta demora na reação pozolânica ocorre visto que somente após este prazo é que o pH dos poros está básico o suficiente para que ocorra a dissolução da cinza volante (FRAAY *et al.*, 1989). Quanto maior o teor de substituição, maior é o período necessário para que ocorra a reação pozolânica, visto a menor disponibilidade alcalina (LAM *et al.*, 2000).

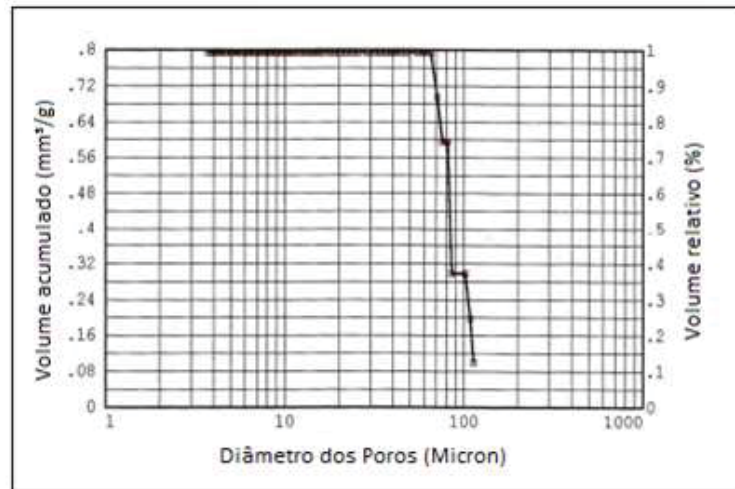
### 3.3. INFLUÊNCIA DA POZOLANA NA POROSIDADE E PERMEABILIDADE

As pozolanas tendem a reduzir a permeabilidade da estrutura cimentícia e aumentar a sua durabilidade, pois além da reação química com o hidróxido de cálcio, tratam-se de materiais finos, e, por esta razão, têm o potencial de refinamento dos poros da estrutura cimentícia (KHAN e ALHOZAIMY, 2011; HASHIM e HAMID, 2015; TIRONI *et al.*, 2017). As partículas de sílica ativa, por exemplo, têm dimensões geralmente contidas entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$  e superfície específica de cerca de 13.000 a 30.000  $\text{m}^2/\text{kg}$  frente a 300 a 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  de um cimento Portland comum. Deste modo, a sílica ativa, além de apresentar uma elevada pozolanicidade, é também efetiva como filer, reduzindo a permeabilidade, porosidade, dimensão dos poros e absorção de água (MATTE e MORANVILLE, 1999; NEWMAN e CHOO, 2003; PONS *et al.*, 2006; VALIPOUR *et al.*, 2013; BERTOLINI *et al.*, 2013). Entretanto, Gleize *et al.* (2003) notaram que essa redução da porosidade e microrefinamento dos poros é mais pronunciado a partir dos 28 dias, devido a morosidade para a ocorrência das reações pozolânicas.

Em termos de utilização de metacaulim, Hashim e Hamid (2015) perceberam que a utilização de até 12% da adição gerou pouca variação na porosidade total. Contudo, houve uma redução de cerca de 92% do diâmetro médio dos poros conforme pode ser visto nas Figuras 7 e 8. Já Duan *et al.* (2013) perceberam que a substituição de 10% de cimento por metacaulim reduziu tanto a quantidade total de poros, quanto o seu diâmetro máximo. Os autores também notaram uma queda na penetração de cloretos com a utilização da adição.

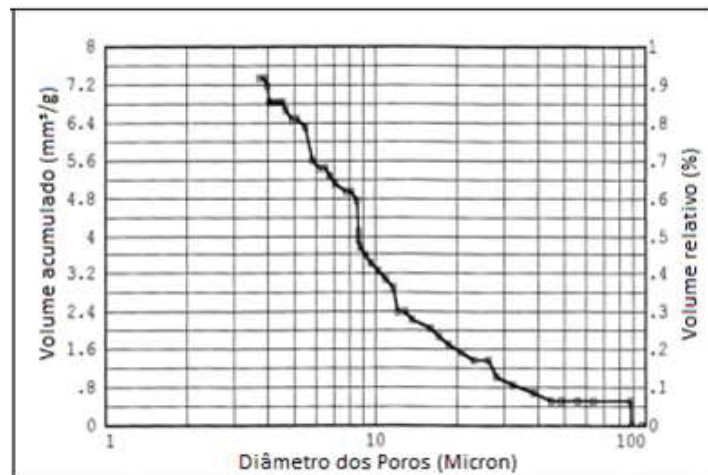
Entretanto, um comportamento oposto ao metacaulim foi percebido por alguns autores com a utilização de cinza volante. Poon, Lam e Wong (1999) perceberam que aos 28 e 56 dias houve um aumento da porosidade total e da permeabilidade, medida por intrusão de mercúrio, das argamassas com o incremento do teor da adição (até 55%). Este incremento da porosidade com o aumento da adição também foi notado por Wang, Zhang e Sun (2004) em idades de até 365 dias.

FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS SEM METACAU LIM



Fonte: Adaptado de Hashim e Hamid, 2015

FIGURA 8 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS COM ADIÇÃO DE METACAU LIM



Fonte: Adaptado de Hashim e Hamid, 2015

Chousidis *et al.* (2015), por sua vez, estudaram o impacto da substituição de cimento por 5 e 10% de cinza volante na absorção capilar, especificamente, e notaram que o uso da adição gerou uma redução no seu valor. Entretanto, esta redução ocorreu somente a partir de 70 dias. Aos 28 dias houve inclusive um leve incremento da absorção. O mesmo fenômeno foi percebido também por Givi *et al.* (2010) e Bicer (2018) os quais comentaram que, em geral, o aumento da porosidade e da permeabilidade, principalmente nas primeiras idades, pode ser justificada pelo fato de se estar utilizando um teor menor de cimento e pela baixa reatividade das pozolanas nas primeiras idades.

## 4. ENSAIOS ACELERADOS E ANÁLISE GRÁFICA

Este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira serão apresentadas algumas metodologias de ensaio acelerado para avaliação de eflorescências que já foram previamente aplicadas por outros autores e na segunda estão demonstrados alguns métodos utilizados para auxiliar na quantificação destas eflorescências.

### 4.1. ENSAIOS ACELERADOS PARA FORMAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA

Aberle *et al.* (2007) comentam que, apesar de haver normatização para ensaio de eflorescência em blocos cerâmicos, ainda não existe um consenso sobre qual a melhor metodologia de ensaio para se avaliar a ocorrência de eflorescência em estruturas cimentícias, e nem como efetivamente quantificar os resultados destes ensaios. Usualmente, a quantificação é realizada somente por meio de uma análise visual, tornando a conclusão subjetiva à percepção do operador. Entretanto, diversas metodologias diferentes já foram aplicadas no meio técnico para esta finalidade. Na Tabela 01 estão resumidos os principais dados das metodologias encontradas na literatura.

Ritchie (1955) realizou um ensaio acelerado para comparar o aparecimento de eflorescências em argamassas mistas com diferentes teores de cimento e cal. Para isso, o autor moldou Corpos de Prova (CP) cilíndricos de 50x100mm e os sujeitou a ciclos de molhagem e secagem. Os CPs foram imersos em água até logo abaixo do nível da sua superfície superior por 14h, seguido de 7h de secagem em condições de laboratório. Este procedimento foi repetido 10 vezes.

Já Wei e Sutan (2013) realizaram para o seu estudo um ensaio acelerado que se baseou em colocar uma lâmina de 10mm de água na superfície dos CPs com 24h de idade. Ao ocorrer a evaporação total desta lâmina, era feita a colocação de uma nova lâmina de 10mm de água. Este procedimento prosseguiu até a data de avaliação final dos corpos de prova, em idades variando em 7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias.

TABELA 1 – RESUMO DOS ENSAIOS ACELERADOS DA LITERATURA (CONTINUA) (PARTE 01/03)

Publicação	Material Estudo	Traços (em massa)	Dimensão CP	Tempo de Cura	Duração do Ensaio	Ambiente	Observações
Ritchie (1955)	Argamassa (cimento, cal e areia)	Variados	Ø50 x 100mm	7 dias	10 dias	Laboratório	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Ciclo de molhagem por imersão por 17h e secagem por 7h;</li> <li>• Quantificação visual da eflorescência.</li> </ul>
Weng <i>et al.</i> (2013)	Argamassa (cimento, areia e metacaulim)	Traço padrão: 1:1 + Substituição de cimento por 5, 10, 15, 20 e 25% de Metacaulim	150x150x30mm	24h	56 dias	T=25°C / UR=85%	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Quantificação da eflorescência pelo MATLAB aos 7 e 56 dias.</li> </ul>
						T=100°C / UR= 90%U/ CO2=100%	
						T= 0-5°C / UR= 2%	
Quarcioni <i>et al</i> (2003)	Argamassa (cimento, cal e areia)	1:0,5:9	40x40x40mm	28 dias	7 dias	T=23 ± 2°C / UR=60±5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Corpos de Prova parcialmente imersos em 5mm de água destilada</li> <li>Quantificação visual da eflorescência.</li> </ul>
					7 dias	Ambiente externo (verão de SP)	
					24 horas	Estufa a 65°C	
					7 dias	Ciclo (14 horas em condição de laboratório e 10h a 60 a 85°C) - calor gerado por lâmpada)	
Bezerra (2012)	Bloco cerâmico	-	Bloco cerâmico	-	7 dias	T=24 ± 8°C/ UR=30-70%	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bloco parcialmente submerso em 2,54cm de água destilada;</li> <li>•Análise visual da eflorescência.</li> </ul>

TABELA 1 – RESUMO DOS ENSAIOS ACELERADOS DA LITERATURA (CONTINUAÇÃO) (PARTE 02/03)

Artigo	Material Estudo	Traços (em massa)	Dimensão CP	Tempo de Cura	Duração do Ensaio	Ambiente	Observações
Hennerfier <i>et al.</i> (2001)	Bloco cerâmico revestido de 5mm de argamassa (cimento e areia)	1:2	-	24h	7 dias	T=23°C / UR=50-70% - Parcialmente imerso em 25mm de água	•Quantificação da eflorescência computacionalmente por análise de escala de cinza (software não divulgado).
						T=33°C / UR=30-50%- Parcialmente imerso em 25mm de água	
						T=23°C / UR=50-70% + pressão de 20cm de água	
						T=33°C / UR= 30-50% + pressão de 20cm de água	
Pernicová (2016)	Argamassa (cimento e areia)	1:4	150x150x150mm	7 dias	7 dias	24 ± 1°C/Umidade variando de 30 a 70% c/ 4h	•Corpos de Prova imersos em 5mm de água destilada; •Quantificação visual da eflorescência.
Yao <i>et al.</i> (2016)	Blend de escoria e cinza volante ativados por álcalis		20x20x20mm	7, 28 e 60 dias	7, 28 e 60 dias	T=22 ± 2°C / UR=60±20%	•Corpos de Prova imersos em 1mm de água destilada; •Quantificação visual da eflorescência.
Kani <i>et al.</i> (2012)	Geopolímero		20x20x20mm	28 dias	28 dias	T=25°C	•Colocação de Corpos de Prova em 40ml de água destilada; até completa evaporação •Quantificação visual da eflorescência.

TABELA 1 – RESUMO DOS ENSAIOS ACELERADOS DA LITERATURA (CONCLUSÃO) (PARTE 03/03)

Artigo	Material Estudo	Traços (em massa)	Dimensão CP	Tempo de Cura	Duração do Ensaio	Ambiente	Observações
Kang e Kwon (2017)	Cimento de escória ativada por álcalis		50x50x50mm	28 dias	14 dias	T=7°C / UR=50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Corpos de Prova imersos em 6mm de água destilada.</li> <li>• Quantificação visual da eflorescência.</li> </ul>
Aberle <i>et al.</i> (2007)	Argamassa (cimento branco, areia e pigmento)	1:3	Telha com 2mm de argamassa	Sem cura	7 dias	Uso de aparato criado para este ensaio pelos autores	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Colocação de 2-3mm de água sobre a placa até evaporação (3x);</li> <li>•Quantificação da eflorescência computacionalmente por análise de escala de cinza (software não divulgado).</li> </ul>
Xue e Qian (2015)	Argamassa (cimento pozolânico e areia)	1:1	300x300x30mm	1 dia	Até evaporação da água (3x)	T=20 ± 3°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Colocação de 10mm de água sobre a placa até evaporação).</li> <li>•Sem quantificação por imagem - somente análise química.</li> </ul>
Wei e Sutan (2013)	Argamassa (cimento, areia e adição)	1:1,67 + Substituição de cimento por 10, 20 e 30% de Cinza Volante e Sílica Ativa	Não divulgado	1 dia	7, 14, 21, 28, 60 e 90 dias	T=28°C / UR=85%	



Weng *et al.* (2013) fizeram moldagens dos CPs de 150x150x30mm e, devido à incerteza sobre a melhor forma de ensaio acelerado, os autores dividiram as amostras em três grupos; cada grupo foi submetido a uma diferente condição de exposição. O primeiro grupo de corpos de prova foi mantido em ambiente com temperatura de 25°C e 85% de umidade. O segundo grupo foi colocado em ambiente com 100% de saturação de dióxido de carbono, 100°C de temperatura e 90% de umidade relativa. Já o terceiro grupo foi mantido refrigerado entre -5°C e 0°C e 2% de umidade relativa. Foram feitas medições de eflorescência com 7 e 56 dias. Após os testes, os autores notaram que o grupo mantido em temperatura mais baixa foi o que apresentou maior quantidade de eflorescência, ou seja, a temperatura baixa sobressaiu o efeito da umidade e da concentração de dióxido de carbono. Possivelmente, isso tenha ocorrido devido ao acréscimo da solubilidade do hidróxido de cálcio com o decréscimo da temperatura. Weng *et al.* (2013) acrescentam ainda que outros estudos haviam previamente documentado que a incidência de eflorescência aumenta com o incremento da umidade ambiente. Entretanto, não foi possível a utilização concomitante da alta umidade neste teste devido a este ter sido realizado próximo à temperatura de congelamento.

Quarcioni *et al.* (2003) também estudaram diferentes condições de ensaio acelerado para formação de eflorescência. Os autores moldaram corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x40mm de quatro tipos de argamassa com traço de 1:1:8 de cimento Portland (tipo não especificado), cal hidratada e areia de quartzo. Os autores adicionaram ainda às argamassas uma adição salina a base de cloreto de potássio, nitrato de sódio e sulfato de magnésio. A variação entre estes tipos de argamassa ocorreu somente na porcentagem desta adição salina.

Após a cura úmida dos corpos de prova por 28 dias, Quarcioni *et al.* (2003) dividiram as amostras em quatro grupos, submetendo-as posteriormente as seguintes condições de exposição:

- a) Condição 1: argamassa parcialmente imersa em água e o conjunto exposto a um ambiente controlado com umidade relativa de  $60 \pm 5\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por 7 dias.

- b) Condição 2: argamassa encapsulada lateralmente em um recipiente plástico, com corpo de prova imerso em água até metade da sua altura e o conjunto exposto a temperatura e umidade do verão paulista por 7 dias.
- c) Condição 3: argamassa parcialmente encapsulada, com corpo de prova imerso em água até metade de sua altura e conjunto mantido em estufa a 65°C durante 24 horas, visando simular a exposição de fachadas à temperatura elevada do verão.
- d) Condição 4: argamassa parcialmente imersa em água, com face superior exposta a radiação térmica, em regime cíclico. Os corpos de prova foram mantidos em uma lâmina de cerca de 5 mm de água deionizada. Os CPs recebiam diariamente 10 horas de radiação térmica por meio de lâmpadas durante 7 dias (temperatura aproximada de 60 a 85°C).

Após os 7 dias de exposição, foram feitas raspagens das eflorescências formada nos CPs e o material foi analisado por meio de difração de raio X para determinar qual sal foi gerado no processo. Assim, Quarcioni *et al.* (2003) obtiveram os seguintes resultados:

- Sob condições 1 e 2 não foi possível observar o aparecimento de eflorescências à olho nu após 7 dias de ensaio, indicando que as condições não foram favoráveis ao aparecimento de sais ou que não houve aceleração suficiente do processo de cristalização para haver o aparecimento significativo desta manifestação patológica neste período de tempo.
- Na condição 3 observou-se que após as 24 horas, todas as argamassas que tiveram adição da solução salina apresentaram eflorescência, sendo sua quantidade proporcional a quantidade de solução salina adicionada. A amostra de referência (sem solução salina) não apresentou eflorescência no teste realizado, indicando que as eflorescências que ocorreram com as outras argamassas foram provenientes de íons originados da solução salina e não do cimento. Isso foi posteriormente comprovado pela elevada presença de sais de sódio, potássio e magnésio por meio de ensaios de DRX. Não se encontrou sais de cálcio nesta condição, possivelmente devido à alta temperatura do teste e a consequente baixa solubilidade destes sais sob esta condição.

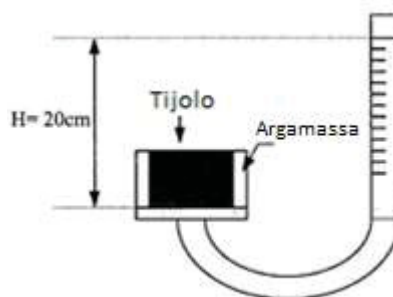
- Na condição 4 todas as argamassas geraram quantidades similares de eflorescência. O ensaio de DRX indicou que os sais gerados eram preponderantemente derivados de cálcio e pequenas quantidades de sódio e potássio, indicando uma lixiviação do hidróxido de cálcio e dos álcalis da pasta de cimento. Por esta razão, segundo os autores, esta condição seria a mais indicada para estudar os ciclos de molhagem e secagem de uma fachada e a eflorescência causada por íons provenientes da hidratação do cimento.

Bezerra (2012) estudou a eflorescência em blocos cerâmicos por meio de um ensaio acelerado proposto na norma americana ASTM C67-92a. O ensaio realizado se resume basicamente em imergir 25,4 mm (1 polegada) de um bloco cerâmico em um recipiente impermeável e resistente a corrosão contendo água destilada. Este bloco é mantido nesta condição por 7 dias. Durante este período é feita a reposição periódica da água perdida. Este ensaio foi realizado em um ambiente com temperatura de  $24 \pm 8^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa entre 30 e 70%. Um bloco de referência também foi separado e mantido no mesmo ambiente, entretanto, sem o contato com a água. Após este período, ambos os blocos (ensaiado e referência) foram levados a um forno a  $100^{\circ}\text{C}$  por 24 horas para secagem. Com o método, o autor conseguiu satisfatoriamente formar eflorescência.

Hennetier *et al.* (2001) estudaram o aparecimento de eflorescência em blocos cerâmicos revestidos com 5 mm de argamassa em suas faces laterais e inferior. Estes blocos com argamassa foram mantidos por 24 horas em ambiente de laboratório antes da realização dos testes. O conjunto também recebeu em suas faces laterais uma camada fina de parafina, visando impermeabiliza-las para não haver perda de sais para estas superfícies. Os corpos de prova foram submetidos as seguintes condições de ensaio para avaliar se a origem da eflorescência formada seria proveniente de sais da argamassa, do tijolo ou da interação entre eles:

- a) Blocos mantidos em 25,4 mm de água em temperatura de  $23^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa entre 50 e 70%.
- b) Blocos mantidos sobre pressão de 200 mm de coluna de água, conforme Figura 9, em ambiente de  $23^{\circ}\text{C}$  e com umidade relativa entre 50 e 70%.

FIGURA 9 – MODELO DO TESTE SOB PRESSÃO



FONTE: Adaptado de Hennetier *et al.*, 2001)

- c) Blocos mantidos em 2,54 cm de água em temperatura de 33°C e umidade relativa entre 30 a 50%.
- d) Blocos mantidos sobre pressão de 200 mm de coluna d'água, em ambiente com temperatura de 33°C e umidade relativa entre 30 e 50%.

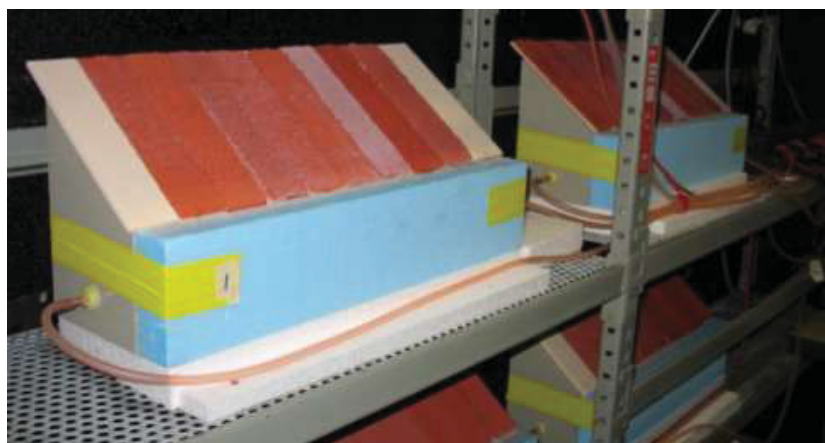
Hennetier *et al.* (2001) perceberam que a ocorrência da eflorescência foi influenciada pela temperatura, mas, principalmente, pela pressão de água aplicada. No caso dos blocos mantidos parcialmente imersos, ocorreu maior aparecimento de eflorescência sob temperatura de 33°C do que sob temperatura de 23°C. Entretanto, a aplicação de pressão de 200 mm de coluna d'água gerou uma eflorescência maior sob qualquer condição de temperatura, apesar de o fenômeno ocorrer mais rapidamente sob 33°C.

Pernicová (2016) realizou um ensaio um pouco diferente para determinação da quantidade de eflorescência gerada utilizando dois cimentos de fornecedores diferentes (tipos de cimento não revelados) e dois tipos de desmoldantes. Neste trabalho, foram moldados corpos de prova (medidas não divulgadas) de concretos produzidos com estes dois cimentos. Estes CPs foram desformados em 24 horas e mantidos em câmara úmida por 7 dias. Destes corpos de prova, foram extraídos CPs menores de 150x150x150mm com os quais foram feitos os testes de eflorescência. Para estes testes, os autores mantiveram os corpos de prova em um recipiente com cerca de 5 mm de lâmina de água destilada e dentro de uma câmara a  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa variando entre 30 e 70%, a cada 4 horas, por um período de 7 dias. Após este teste, os corpos de prova foram secados em estufa a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas. Os resultados foram comparados com os CPs de referência deixados fora da

câmara. A análise química dos sais gerados foi feita por meio de difração de Raio-X e sua quantificação por meio da lavagem das superfícies dos CPs com água destilada e posteriormente secagem e pesagem desta solução.

Aberle *et al.* (2007) sugeriram em seu trabalho um ensaio acelerado para avaliar a formação de eflorescência em argamassas. Os autores aplicaram 2 mm de argamassa sobre uma telha absorvente. Esta telha foi posteriormente colocada sobre um aparelho criado especialmente para este teste e representado na Figura 10. Este aparelho foi mantido dentro de uma câmara com temperatura constante de 7°C e umidade relativa de 80%, por 7 dias. Pelo interior deste aparelho circulava água a 20°C. Segundo os autores, esta diferença entre o ambiente interno e externo da caixa criou dois microclimas diferentes em termos de temperatura e umidade, causando condensação, fluxo capilar e evaporação. Posteriormente a este teste, foi feita uma análise visual e microscópica para confirmar o aparecimento da eflorescência.

FIGURA 10 – APARELHO UTILIZADO NO ENSAIO ACELERADO



FONTE: Aberle *et al.*, 2007

Yao *et al.* (2016), por sua vez, moldaram corpos de prova cúbicos de dimensão 20x20x20mm, os quais foram mantidos em cura a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas. Posteriormente, foi feita a desforma e os CPs foram colocados novamente em cura por 7, 28 e 60 dias em câmara com temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $60 \pm 20\%$ .

Sequencialmente a esse período de cura, visando avaliar o aparecimento de eflorescência, os corpos de prova foram mantidos imersos em 1mm de água destilada por períodos variando de 7, 28 e 60 dias. Após este procedimento, uma análise visual

dos corpos de prova foi realizada. Com isso, Yao, Yang e Zhang (2016) perceberam os seguintes:

- Os CPs curados por somente 7 dias apresentaram somente um leve aparecimento de eflorescência após 7 dias em contato com a lâmina de água. A severidade da eflorescência aumentou com o acréscimo do tempo de contato com a lâmina d'água;

- Os CPs mantidos fora da lâmina de água não apresentaram eflorescência, independentemente do tempo que permaneceram na câmara de cura, demonstrando, desta forma, a eficiência do teste.

- Os CPs mantidos em cura por períodos maiores do que 7 dias apresentaram menor quantidade de eflorescência. Segundo os autores, isso ocorreu devido a hidratação mais avançada do cimento, resultando em uma menor lixiviação.

Kani *et al.* (2012) realizaram um ensaio acelerado similar ao praticado por Yao *et al.* (2016). Neste estudo, foram moldados corpos de prova cúbicos de 20x20x20mm, os quais foram curados por 28 dias em câmara úmida com 95% de umidade relativa e temperatura de 25°C. Após este período, os corpos de prova foram imersos em 40ml de água destilada em ambiente com temperatura de 25°C até completa evaporação desta água. Esta evaporação ocorreu em aproximadamente 2 semanas. Apesar disso, os CPs foram mantidos no local por mais 2 semanas para que secassem completamente. A quantificação da eflorescência foi feita somente por meio de uma análise visual.

Kang e Kwon (2017) também realizaram um ensaio similar ao anterior, entretanto, com temperatura mais baixa. Para isso, foram moldados corpos de prova de 50x50x50mm, os quais foram curados por 28 dias a 25°C e 60% de umidade relativa. Após este período, os CPs tiveram suas laterais seladas com epóxi e foram colocados em uma lamina de água de 6mm por 14 dias em ambiente com temperatura controlada de 7°C e 50% de umidade relativa.

Xue e Qian (2015) também analisaram por meio de ensaio acelerado o aparecimento de eflorescência. Este ensaio baseou-se na moldagem de placas de argamassa de 300x300x30 mm e, após um dia da moldagem, na colocação de 2 a 3 mm de água sobre a superfície da placa em ambiente com temperatura controlada de

20±3°C. Havendo o desaparecimento desta lâmina de água, esta era repostada. Este procedimento repetiu-se 3 vezes.

Conforme já comentado anteriormente, pode-se perceber a ausência de consenso na metodologia para realização de ensaios acelerados de eflorescência em argamassas, seja nas dimensões dos corpos de prova, ou mesmo nas condições de ensaio. Apesar disso, todos os autores conseguiram a formação de eflorescência, exceto Quacioni *et al.* (2013) sob as condições 1 e 2 (conjunto em temperatura de laboratório e exposto ao verão paulistano). Devido a esta grande heterogeneidade de situações de ensaio, percebe-se a necessidade da realização de novos testes, comparando-se diferentes metodologias, a fim de conseguir selecionar a mais adequada para o experimento em questão. Esta etapa será realizada preliminarmente neste trabalho.

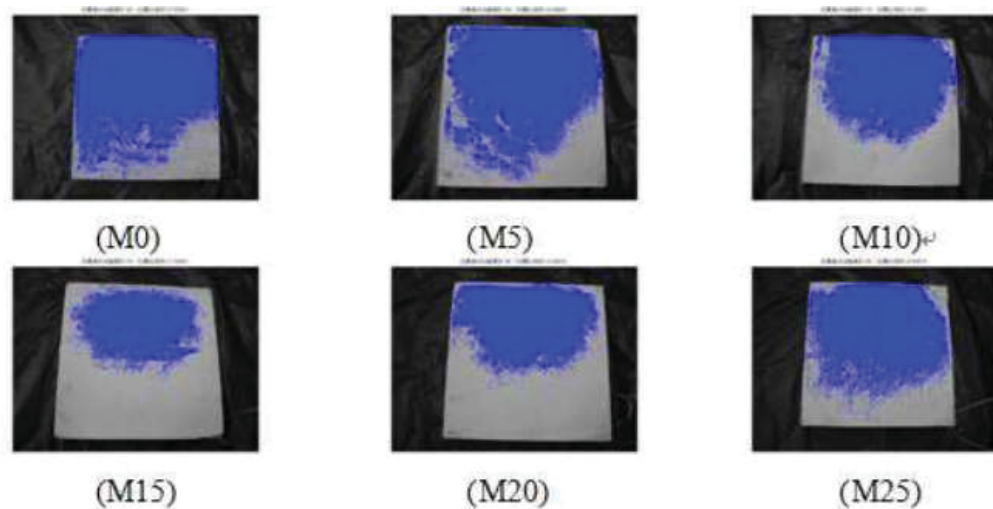
#### 4.2. ANÁLISE GRÁFICA PARA QUANTIFICAÇÃO DA EFLORESCÊNCIA

Jang *et al.* (2014) utilizaram para a quantificação da eflorescência formada em seu estudo um espectrofotômetro (Minolta CM-2600). Este aparelho realiza a medição de luminosidade e cor. A fim de facilitar a análise, as argamassas haviam sido moldadas com pigmentos coloridos (vermelho, amarelo e verde). Com este equipamento foi possível notar uma alteração nos picos de luminosidade. Estas mudanças observadas indicam que houve alterações na tonalidade da cor, ficando mais clara devido à eflorescência.

Weng *et al.* (2013), por sua vez, utilizaram para avaliação dos seus resultados um processo de análise de imagem baseado em fotografias. Os autores realizaram análises da variação no padrão de cor RGB com o auxílio do software MATLAB, conforme demonstrado na Figura 11. Entretanto, esta avaliação gráfica somente possibilitava a visualização da área afetada, sem conseguir quantificar a espessura da camada de sais cristalizados. Para isso, foi realizada raspagem com posterior pesagem deste material superficial formado.



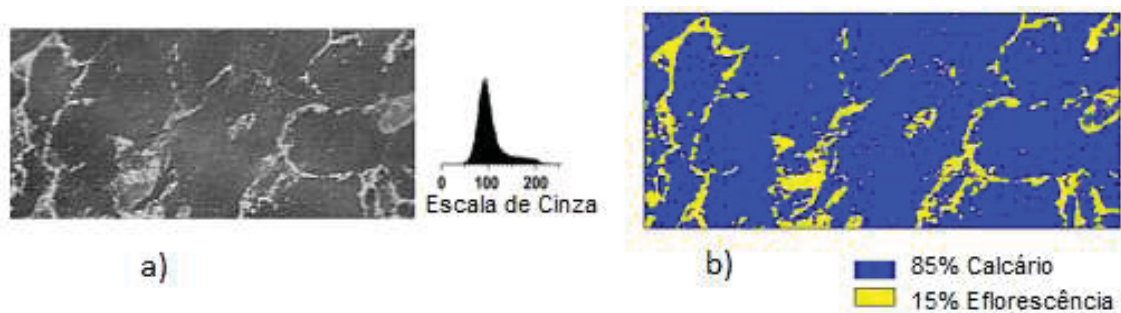
FIGURA 11 – ANÁLISE DA EXTENSÃO DA EFLORESCÊNCIA PELO SOFTWARE MATLAB COM TEOR DE METACAULIM VARIANDO DE 0 A 25%



FONTE: Weng *et al.*, 2003

Vázquez *et al.* (2011) fizeram a quantificação de eflorescência através de uma análise de fotografias digitalizadas, vetorizadas e, posteriormente, convertidas em escala de cinza. A análise das imagens foi realizada pelo sistema GEOJARS-10. Neste caso, definiu-se por meio do histórico da análise de diversas imagens com e sem eflorescências que valores de 0 a 130 na escala de cinza seriam referentes ao material sem eflorescência e valores entre 131 e 255 referentes à eflorescência. A partir destas definições, Vázquez *et al.* (2011) converteram as fotográficas do experimento para imagens binárias e fizeram o cálculo da porcentagem da área afetada pela manifestação patológica, conforme demonstrado na Figura 12.

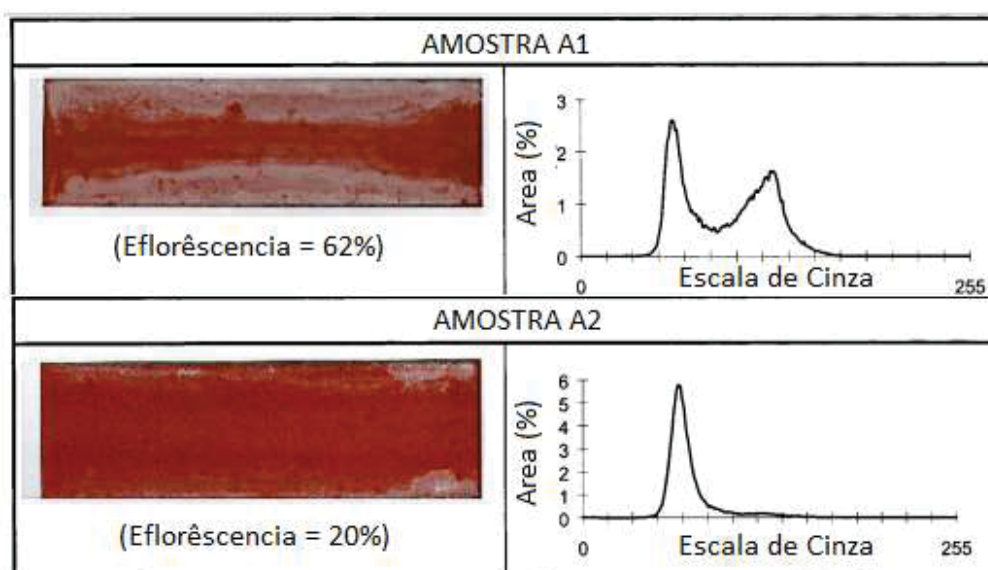
FIGURA 12 – ANÁLISE DE TONS DE CINZA (A) E POSTERIOR CONVERSÃO PARA IMAGEM BINÁRIA (B)



FONTE: Vázquez *et al.*, 2011

Hennetier *et al.* (2001) utilizaram o analisador de imagens Quantimet 500 para quantificar a efluorescência formada em seus testes. Por meio deste equipamento verificaram o nível de cinza de cada pixel da fotografia, caracterizando-os de 0 (preto) a 255 (branco). Os autores então compararam as curvas obtidas das peças que foram sujeitas ao ensaio acelerado com a curva original das peças de referência, sem efluorescência. Desta forma, foi possível fazer a quantificação da área afetada pela manifestação patológica, conforme Figura 13.

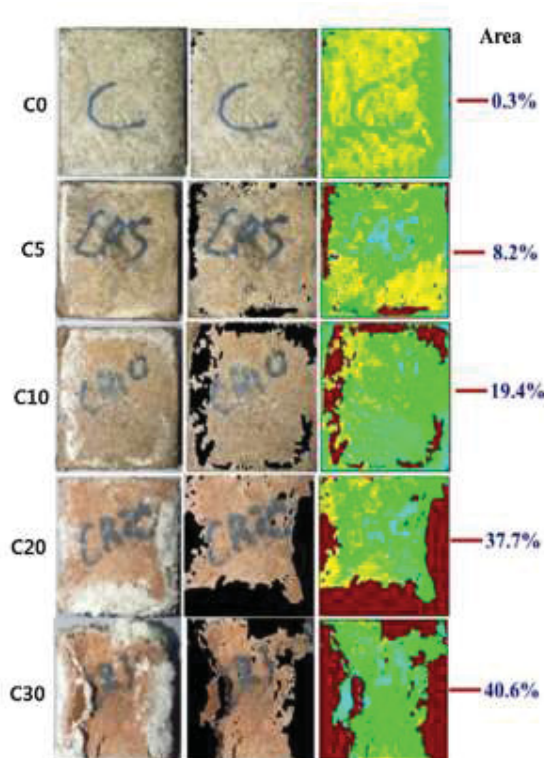
FIGURA 13 – EXEMPLO DA ANÁLISE DA ESCALA DE CINZA DE DUAS AMOSTRAS DISTINTAS



FONTE: Hennetier *et al.*, 2001

Kang e Kwon (2017) obtiveram fotografias dos corpos de prova após a realização de um teste acelerado e quantificaram a área afetada pela efluorescência através da análise destas imagens por meio do software Paint.NET, conforme demonstrado na Figura 14.

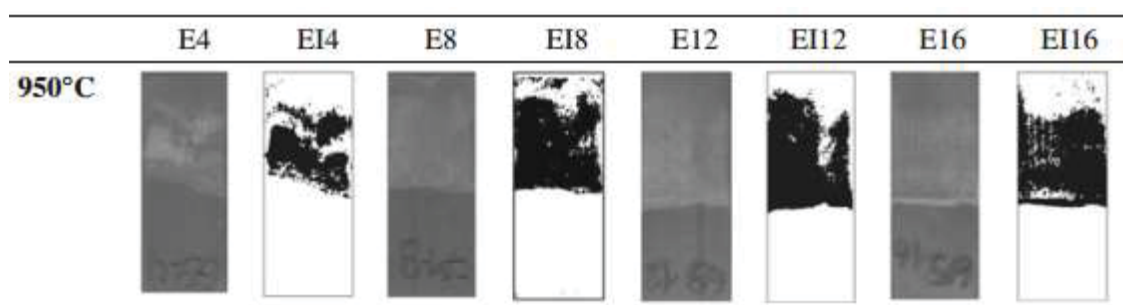
FIGURA 14 – ANALISE GRÁFICA COM DIFERENTES TEORES DE LAMA VERMELHA (0 A 30%)



FONTE: Kang e Kwon, 2017

Farreira e Bergmann (2010), por sua vez, fizeram um tratamento de imagem utilizando o software Image Tools 3.0. O método baseou-se em mapear a imagem em preto e branco e analisar, posteriormente, os pontos pretos gerados, indicando eflorescência, conforme visto na Figura 15.

FIGURA 15 – ANALISE GRÁFICA DA EFLORESCÊNCIA



FONTE: Farreira e Bergmann, 2010

Percebe-se que, exceto por Jang, Kang e So (2014), todos os demais autores utilizaram softwares computacionais para realizar a análise gráfica das fotografias dos corpos de prova e conseguir, desta forma, quantificar o aparecimento de

eflorescência. Apesar de não haver um consenso no software utilizado, todas as análises se baseiam no mesmo princípio: conseguir graficamente isolar a área afetada pela eflorescência devido a sua diferença de coloração frente ao material sem eflorescência. Desta forma, pode-se concluir que independentemente do software escolhido, uma análise gráfica para quantificação da área afetada pela eflorescência é possível, desde que os parâmetros de separação entre áreas afetadas e não afetadas pela eflorescência sejam adequadamente determinados.

## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

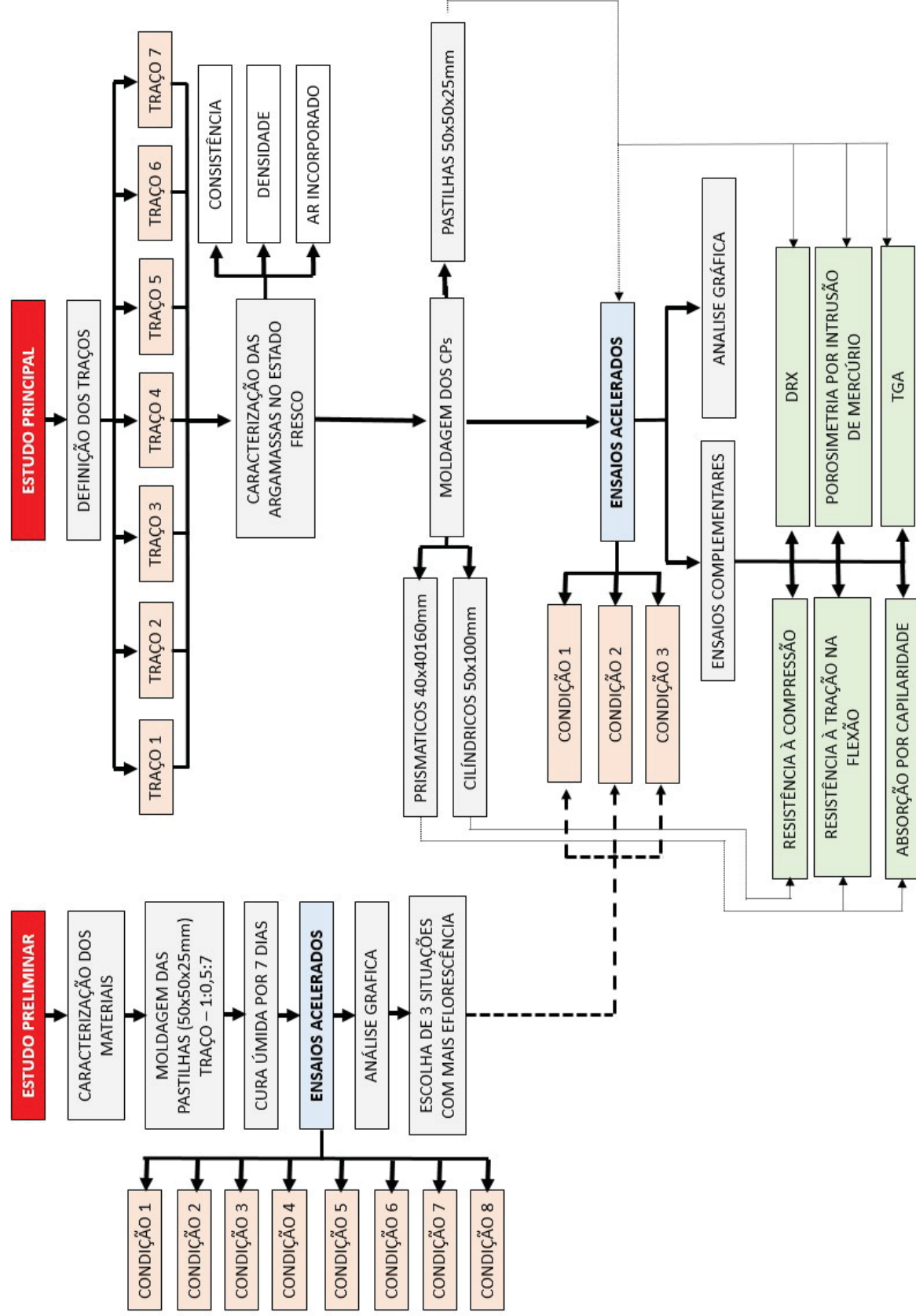
Como já comentado anteriormente, esta dissertação tem como objetivo principal avaliar o impacto do uso de adições pozolânicas e da dosagem de cal na incidência de eflorescências. Entretanto, devido à inexistência de uma normatização para o ensaio de eflorescência em argamassas e a morosidade pela qual este fenômeno ocorre de forma natural, este trabalho primeiramente tem como foco encontrar, dentre metodologias já usadas por outros autores e algumas novas sugeridas nesta dissertação, quais conseguem satisfatoriamente acelerar o processo de formação desta manifestação patológica (estudo preliminar). Somente após esta definição é que foi possível a realização da análise principal deste presente trabalho (estudo principal).

Neste item, serão demonstrados primeiramente os materiais utilizados, junto com suas devidas caracterizações, seguidamente das metodologias utilizadas em cada uma das etapas experimentais desta dissertação.

Na Figura 16 está apresentado um fluxograma dos experimentos realizados neste estudo. Cada um dos ensaios que compõe este trabalho será melhor detalhado no decorrer deste capítulo. Entretanto, pode-se adiantar que na etapa preliminar testou-se oito diferentes metodologias de ensaio acelerado, utilizando-se o mesmo traço padrão. Destas metodologias, escolheu-se as três que mais geraram eflorescência, no período de 28 dias de ensaio, para serem utilizadas na fase principal deste trabalho.

Na etapa principal comparou-se a quantidade de eflorescência formada com a utilização de sete diferentes traços, variando a quantidade e tipo de adição pozolânica (cinza volante e sílica ativa) e a quantidade de cal. Nesta etapa do experimento, ensaios adicionais (TGA, DRX, porosimetria de mercúrio, absorção por capilaridade e resistência à compressão e à tração na flexão) foram realizados com foco em encontrar explicações para os resultados observados nos ensaios acelerados de eflorescência. Para realização destes ensaios complementares, diferentes formatos de corpos de prova foram moldados.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DO EXPERIMENTO



## 5.1. MATERIAIS

Todos os materiais utilizados nesta pesquisa foram caracterizados e estão apresentados neste item. Primeiramente, estão apresentados os aglomerantes (cimento e cal), seguido das adições minerais (sílica ativa e cinza volante) e, por último, o agregado miúdo.

### 5.1.1. Aglomerantes

O cimento utilizado para esta pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Segundo o fabricante, este cimento possui 96% de clínquer e gesso e 4% de filer calcário. As características químicas, físicas e mecânicas deste cimento estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

A razão para a escolha do cimento do tipo CPV-ARI foi devido ao fato deste cimento não conter adições pozolânicas. Como um dos objetivos deste trabalho é analisar o efeito de adições pozolânicas na mitigação da eflorescência, a utilização de um cimento já com adição pozolânicas, como um CPII-Z ou CPIV, poderia implicar em interferências nos resultados. A massa específica deste cimento é de 3,07 g/cm<sup>3</sup>.

TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND USADO NA PESQUISA

Finura		Tempo de Pega		Resistência à compressão (MPa)				Exigências Químicas (%)	
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	#200 (%)	Início (min)	Fim (min)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	Resíduo Insolúvel	Perda ao fogo
4710	0,3	250	310	22,2	37,1	41,5	49,2	0,40	3,20

Observando-se a Tabela 2, pode-se notar que o cimento utilizado apresenta uma alta resistência, tanto inicial, como final, conforme esperado. Além disso, os valores de resíduo insolúvel e perda ao fogo corroboram o divulgado pelo fornecedor, de que este cimento não apresenta material pozolânico e somente uma pequena adição de filer calcário.



TABELA 3 – FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X DO CIMENTO

Amostra	Composição Química (%)								
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO
Cimento	19,2	1,68	2,85	62,75	4,19	0,05	0,17	3,04	2,54

Analisando-se os resultados da fluorescência de Raio-X apresentada na Tabela 3, pode-se observar ainda uma preponderância de CaO e SiO<sub>2</sub>, o que indica que o clínquer utilizado realmente apresenta uma maior quantidade de C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S do que fases aluminosas. Isso é confirmado com as quantidades de C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF do clínquer apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 – DADOS DO CLÍNQUER

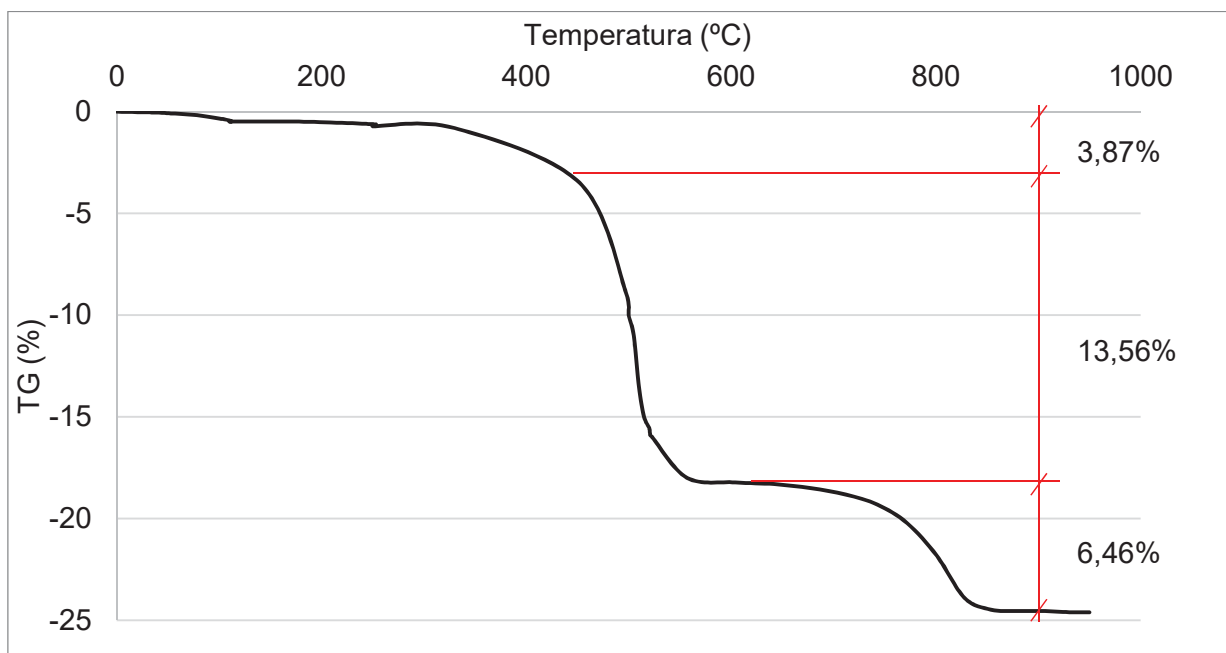
Amostra	C <sub>3</sub> A (%)	C <sub>3</sub> S (%)	C <sub>2</sub> S (%)	C <sub>4</sub> AF (%)
Clínquer	6,81	61,56	13,88	9,79

Já a cal hidratada utilizada é dolomítica do tipo CH-III, devido a ser o tipo mais encontrado na região de Curitiba. Na Tabela 5 está apresentada a composição química desta cal, ensaiada através de fluorescência de Raio-X. A cal utilizada apresenta massa unitária de 0,68 g/cm<sup>3</sup> e massa específica de 1,71 g/cm<sup>3</sup>. Na Figura 17 está apresentada a TGA desta cal.

TABELA 5 – FLUORESCÊNCIA DE RAIO-X DA CAL HIDRATADA

Amostra	Composição Química (%)							
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO
Cal	0,73	0,12	0,29	47,54	0,25	0,13	0,12	26,93

FIGURA 17 – TERMOGRAVIMETRIA DA CAL



Analizando-se os resultados de fluorescência de Raio-X e de termogravimetria desta cal pode-se perceber que além de hidróxido de cálcio, outros compostos também estão presentes neste material, principalmente óxido de magnésio. A presença deste composto já havia sido previamente notada por outros autores que trabalharam com cales da região de Curitiba, como Macioski (2017). A quantidade de óxido totais não voláteis, calculada de acordo com a NBR 7175:2003, é de 97,8%, superior ao mínimo de 88% exigido por esta norma para cales do tipo CH-III.

#### 5.1.2. Adições Minerais

No presente estudo foram utilizadas duas adições minerais, a sílica ativa e a cinza volante. Escolheu-se utilizar estas adições devido ao fato de a cinza volante ser a adição normalmente encontrada em cimentos do tipo CII-Z e CII-V, e a sílica ativa ser uma adição conhecida por ser mais reativa e que também é amplamente aplicada. Na Tabela 4 está apresentada a composição química de cada uma destas adições, realizada por meio do ensaio de fluorescência de Raio-X. Com estes resultados, pode-

se observar que ambas as adições apresentam o óxido de silício como o composto majoritário, como esperado para uma pozolana.

TABELA 6 – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DAS ADIÇÕES MINERAIS

Amostra	Composição Química (%)										
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	ZnO	MnO	SO <sub>3</sub>	Rb <sub>2</sub> O	CuO
Sílica Ativa	92,56	2,71	0,17	0,53	1,96	-	0,01	0,05	1,98	0,01	0,02
Cinza Volante	58,50	2,8	6,35	1,82	26,47	1,0	0,10	0,06	0,35	0,10	-

Na Tabela 7 constam os resultados de massa específica, finura e atividade pozolânica destes materiais. Segundo Reverdy *et al.*<sup>2</sup>. (1980 *apud* Garcia *et al.* 2014), um material é classificado como pozolânico quando apresenta uma pozolanicidade superior a 330mg CaO/g de pozolana, o que corresponde por estequiometria a 436 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g. Ambas as adições utilizadas neste trabalho apresentaram resultados satisfatórios de atividade pozolânica. Realizou-se o ensaio pelo método de Chapelle modificado, conforme descrito na NBR 15.895 (2010). Estes resultados observados, tanto de finura, como de atividade pozolânica, estão coerentes com o que outros autores já notaram ao ensaiarem estes tipos de adições (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; KANNING, 2013; QUARCIONI, *et al.*, 2015; BARROSO, 2011).

TABELA 7 – MASSA ESPECÍFICA, FINURA E ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS ADIÇÕES

Material	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Área Específica (Blaine) (m <sup>2</sup> /kg)	Atividade Pozolânica – Chapelle Modificado [mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g]
Sílica Ativa	2,19	20.325	1.157
Cinza Volante	1,95	3.852	452

As Figuras 18 e 19 apresentam os resultados de difração de Raios-X das duas adições. Em ambas as figuras está representado o halo amorfo, ou seja, a parcela reativa destes materiais. Como pode ser visto, tanto na difração de Raios-X, quanto

<sup>2</sup> RIVERDY, M. *et al.*, Appréciation de l'activité pozzolanique des constituants secondaires. **Congrès international de la chimie des ciments**, vol. 7., 1980, Paris.

nos resultados de atividade pozolânica, a sílica ativa aparenta ter uma reatividade superior à da cinza volante.

FIGURA 18 – DIFRAÇÃO DE RAIO-X DA SÍLICA ATIVA, COM ÊNFASE NO HALO AMORFO

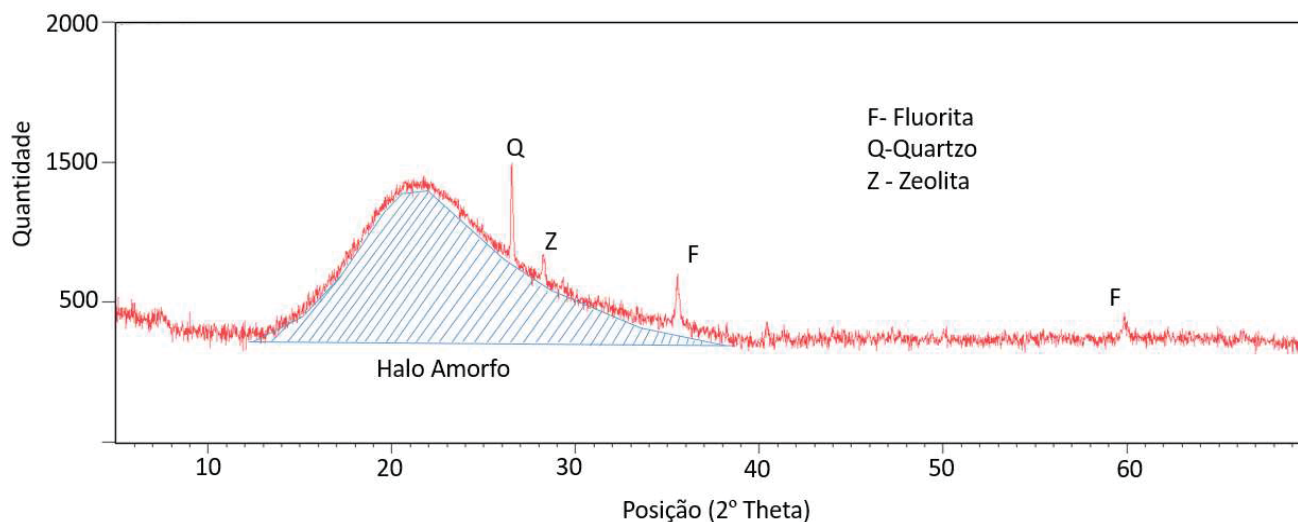
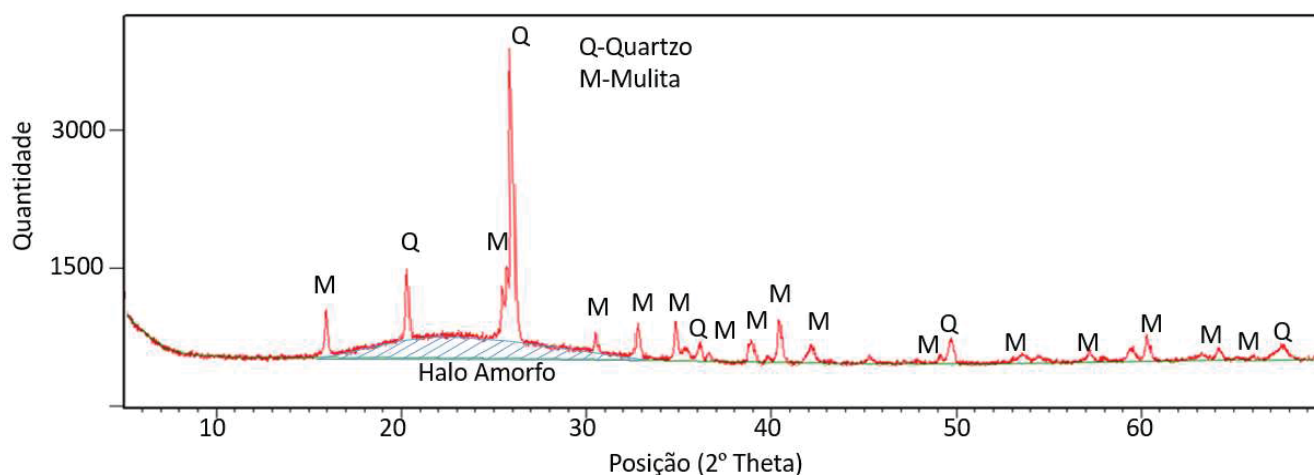


FIGURA 19 – DIFRAÇÃO DE RAIO-X DA CINZA VOLANTE, COM ÊNFASE NO HALO AMORFO



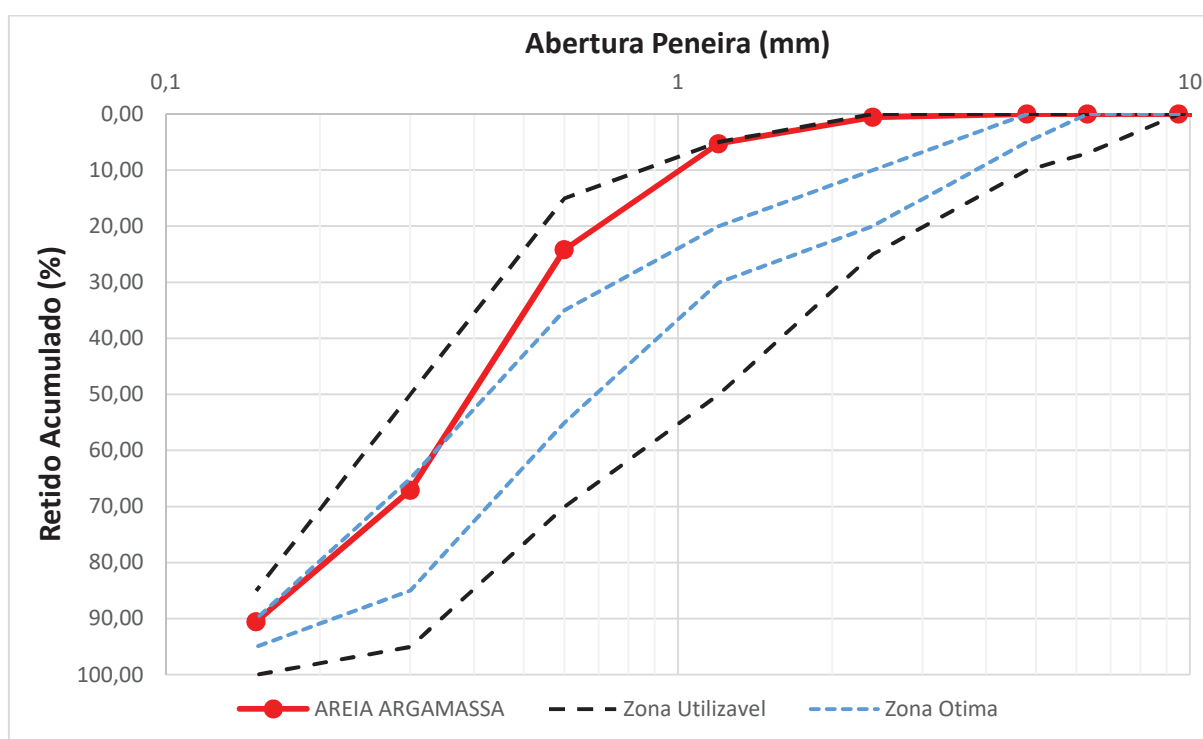
### 5.1.3. Agregado miúdo

Foi utilizada neste trabalho uma areia natural de quartzo proveniente do Rio Iguaçu, extraída na região metropolitana de Curitiba próximo ao bairro Sitio Cercado, comumente utilizada pelas concreteiras da região. Na Tabela 8 estão apresentadas as características deste material e na Figura 20 a sua distribuição granulométrica.

TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO

Areia Natural	Resultado	Norma
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	NBR NM 52 (2009)
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,57	NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura	1,88	NBR NM 248 (2003)
Teor de material pulverulento (%)	0,85	NBR 7221 (2012)

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO



Pode-se observar pelos resultados apresentados na Tabela 7 que a areia utilizada é uma areia fina, com módulo de finura de 1,88, segundo critério constante na NBR 7211 até 1989. Entretanto, esta contém uma baixa quantidade de material pulverulento (0,85%).

Analisando-se a Figura 20, nota-se que a curva granulométrica da areia se encontra dentro da zona utilizável superior da NBR 7211 (2009). Contudo, é importante observar que esta norma se trata de uma curva ótima para concreto e não especificamente para argamassa.

#### 5.1.4. Água e pó xadrez

Utilizou-se na mistura das argamassas: água fornecida pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) e pó xadrez preto da marca Lanxess. A utilização de pó xadrez se fez necessária uma vez que argamassas previamente produzidas sem este produto e com a utilização de cimento do tipo CPV-ARI, apresentaram uma coloração muito clara, fato que dificultaria a visualização posterior das eflorescências.

Segundo o fabricante, este produto é composto basicamente de pigmentos inorgânicos de óxido de ferro e não apresenta reação com o cimento. O mesmo tipo de pigmento já foi utilizado anteriormente por Aberle *et al.* (2007) e Jang *et al.* (2014), com foco em melhorar a análise do aparecimento de eflorescência.

### 5.2. EXPERIMENTOS

O principal dado de interesse desta pesquisa é verificar qual a relação entre o uso de adições pozolânicas (sílica ativa e cinza volante) e de cal com o aparecimento de eflorescência em argamassas.

Devido à inexistência de uma normatização para o ensaio de eflorescência em argamassas, este trabalho primeiramente tem como foco encontrar, dentre as metodologias já usadas por outros autores e algumas novas, quais conseguem satisfatoriamente acelerar o processo de formação de eflorescência (estudo preliminar). Somente após esta definição é que foi possível a realização da análise principal deste presente trabalho (estudo principal).

A seguir será melhor detalhada cada uma destas duas etapas.

### 5.2.1. Estudo Preliminar

Nesta primeira etapa, o único parâmetro variável foi a condição de ensaio acelerado. Todos os demais fatores foram mantidos constantes.

O traço praticado foi o de 1:0,5:7 (cimento:cal:areia) em massa. A escolha deste traço se deu devido ao traço 1:1:6 em volume (equivalente ao 1:0,5:7 em massa) ser muito praticado em campo, principalmente para reboco externo. Além disso, este traço também já foi amplamente utilizado em outras pesquisas (CANDIA e FRANCO, 1998; BIANCHIN, 1999; SILVA, 2006; GUACELLI, 2010). A quantidade de água no traço foi ajustada para se conseguir no ensaio de consistência um valor de 260 mm, executado conforme a norma NBR 13276 (2016). Este fato levou a uma relação de água/materiais secos final de 0,149 e de água/finos de 0,85. Nestas relações foram considerados como fino somente os aglomerantes. Optou-se por não considerar o pó xadrez por este ter sido utilizado somente como pigmento. O traço final está apresentado na Tabela 9. Toda a mistura foi realizada em misturador mecânico, seguindo o procedimento da NBR 13.276 (2016).

TABELA 9 – TRAÇO UTILIZADO NO ESTUDO PRELIMINAR

Cimento	Cal	Areia	Água	Pó Xadrez
300g	150g	2.100g	380g	18g

Inicialmente, testou-se o traço sem a utilização de pó xadrez. Entretanto, devido a coloração clara do cimento CPV-ARI, a argamassa final ficou com uma cor cinza claro, próximo ao branco, fato que dificultaria a posterior visualização das eflorescências formadas. Devido a isso, optou-se pela utilização de 6% de pó xadrez sobre o peso de cimento. Esta porcentagem é inferior ao limite máximo recomendado pelo fabricante de 8%. Testou-se inicialmente uma porcentagem menor, de 4%. Contudo, a argamassa final ainda apresentou uma coloração clara com esta dosagem.

Com este traço foram moldadas 24 pastilhas de 50x50x25 mm, sendo 3 para cada situação de ensaio que será descrita na sequência. Não há na literatura consultada um consenso com relação a dimensão ideal da pastilha de argamassa para este teste. A escolha da dimensão 50x50 mm foi proveniente do trabalho de Kang



e Kwon (2017). Dimensões menores, como as praticadas por Xue e Qian (2015) ou Jang *et al.* (2014), poderiam dificultar a visualização da eflorescência. Com relação à espessura de 25 mm, esta medida foi escolhida para estar em conformidade com a NBR 13749:2013, a qual limita como espessura admissível do revestimento externo de 20 a 30 mm. Optou-se pelo valor intermediário.

O adensamento das pastilhas foi feito através de 10 golpes com o soquete padrão utilizado para o ensaio de mesa de consistência.

As pastilhas foram desmoldadas depois de 24 h e mantidas em câmara úmida durante 7 dias ( $T = 22 \pm 2^\circ$  e  $UR \geq 95\%$ ). Também não foi possível encontrar na literatura um consenso com relação ao prazo de cura necessário para se iniciar o teste de eflorescência acelerado. Weng *et al.* (2013), Xue e Qian (2015) e Wei e Sutan (2013) sujeitaram os corpos de prova ao ensaio acelerado logo após a desmoldagem. Já Quarcioni *et al.* (2003) aguardou 28 dias e Pernicova (2016) somente 7 dias. Entretanto, há a necessidade de que ao menos parte da reação do  $C_3S$  e  $C_2S$  ocorra antes de se iniciar o teste acelerado, visto que são estes os compostos que liberam hidróxido de cálcio em suas hidratações. Como para este trabalho utilizou-se cimento do tipo CPV-ARI, o qual mais de 80% das reações já ocorrem antes dos 7 dias, optou-se por iniciar o teste 7 dias após a desforma.

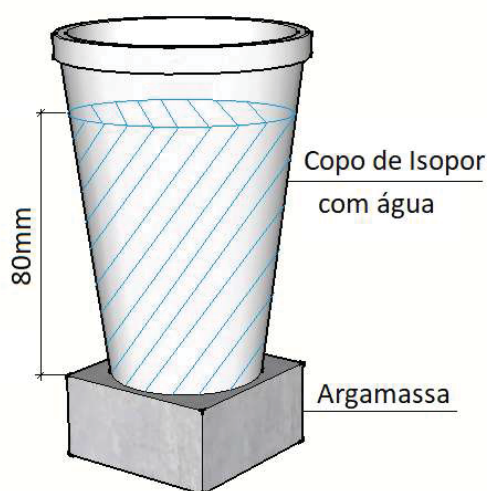
Após este prazo, as pastilhas tiveram suas superfícies superiores e inferiores lixadas para remover o acabamento vitrificado da utilização da forma metálica. Além disso, suas laterais foram seladas com silicone neutro, a fim de permitir somente um fluxo unidirecional de água durante os experimentos e evitar perdas de sais para estas superfícies.

Foram escolhidas oito metodologias diferentes de ensaio para analisar a aceleração da eflorescência, visando conseguir um aparecimento satisfatório em um prazo de até 28 dias. As metodologias I a IV descritas a seguir foram baseadas na literatura, enquanto as demais são propostas de metodologia deste estudo.

- I. Colocação de uma lâmina de água de 3 mm sobre as pastilhas. Havendo o desaparecimento desta lâmina, esta era recolocada até a finalização do ensaio com 28 dias. Similar ao praticado por Xue e Quan (2015) – denominado daqui para frente como “AS” (Água Superficial);

- II. Pastilhas parcialmente submersas em uma lâmina de 5 mm de água e sua face superior exposta ao ambiente. Recolocação diária de água a fim de manter sempre a mesma altura da lâmina. Similar ao realizado por Quarcioni *et al.* (2003) – denominado como “AR” (Exposto ao ar);
- III. Pastilhas parcialmente submersas (5 mm) e sua face superior exposta por 14 h a temperatura ambiente e por 10 h a irradiação térmica proveniente de uma lâmpada UV, mantendo a temperatura na superfície da pastilha próxima dos 40°C. Similar ao realizado por Quarcioni *et al.* (2003) – denominado “A+C” (Ar + Calor);
- IV. Realização de ciclos de molhagem e secagem. As pastilhas foram parcialmente submersas em uma lâmina de 5 mm de água por 12 horas. Após este prazo, foram retiradas da lâmina de água e deixadas secar naturalmente por 24 horas. Este ciclo se repetiu por 28 dias. Baseado em Ritchie (1955) – denominado “CS” (Ciclos de secagem e molhagem);
- V. Sobre a face superior das pastilhas foram fixados copos de isopor sem o fundo, conforme Figura 21. Estes copos foram preenchidos com uma altura de água de 80 mm, a qual foi mantida constante por 28 dias, com reposição diária – denominado “COPO”;

FIGURA 21 – CROQUI DA CONDIÇÃO “V”.

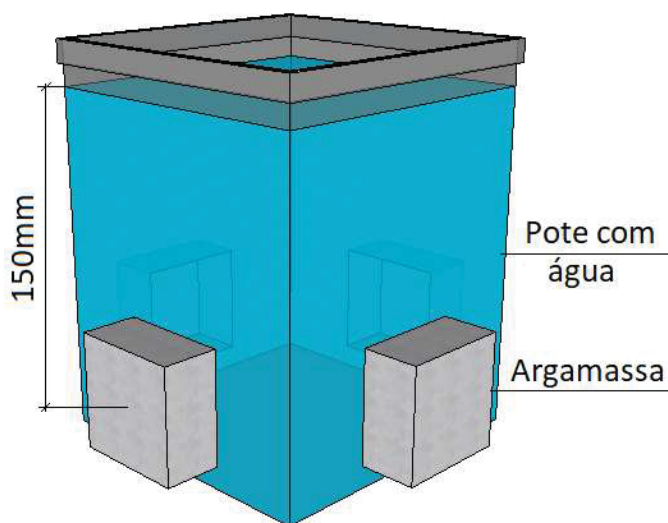


- VI. Pastilhas mantidas parcialmente submersas em uma lâmina de 5 mm de água e colocadas em geladeira por 14 h e deixadas 10 h em temperatura ambiente. A escolha da utilização de temperaturas baixas se deu devido aos ensaios realizados por Weng *et al.* (2013), que notaram maior

aparecimento de eflorescência quando as pastilhas estavam nesta condição. Além disso, segundo Helene e Pereira (2007), a solubilidade do hidróxido de cálcio é maior em temperaturas baixas – denominado “G+Ar” (Geladeira + Ar);

- VII. Pastilhas mantidas parcialmente submersas em uma lâmina de 5 mm de água e colocadas em geladeira por 14 h e exposta a 10 h de irradiação térmica por meio de uma lâmpada UV (temperatura na superfície das pastilhas de aproximadamente 40°C) – denominado “G+C” (Geladeira + Calor);
- VIII. Pastilhas fixadas lateralmente a um pote plástico e este pote preenchido com 150 mm de água, conforme Figura 22- denominado “Pote”

FIGURA 22 – CROQUI DA CONDIÇÃO “VIII”.



Na Tabela 10 estão apresentadas de forma resumida as principais características de cada uma destas metodologias utilizadas.

Após o prazo de 28 dias de ensaio, as pastilhas foram retiradas do contato com a água e aguardou-se 48 h para sua completa secagem. Posteriormente, todas foram fotografadas individualmente a 10 cm de distância, sem utilização de flash. Estas imagens foram então utilizadas para a quantificação da eflorescência através de uma análise gráfica no modelo de cor  $L^*a^*b$  com o auxílio do software MATLAB, similar ao

realizado por Weng *et al.* (2013). Entretanto, ao contrário destes autores, optou-se por realizar a análise no padrão de cores  $L^*a^*b$ , ao invés de RGB, por se conseguir, desta forma, um melhor isolamento da eflorescência. Para esta análise gráfica, primeiramente utilizou-se o plug-in “Color Therseshold” para aplicar um filtro, fazendo um corte no valor de luminosidade do padrão  $L^*a^*b$  em 75. Estipulou-se este limite de luminosidade (L) de 75 a fim de conseguir satisfatoriamente demarcar somente a área afetada pela eflorescência durante a análise de imagem, como pode ser visto na Figura 26. Posteriormente, esta máscara azul gerada foi exportada para um plug-in dentro do MATLAB chamado “Image Region Analyser” para extração das áreas. Estas então foram enviadas para o Excel, onde calculou-se as respectivas porcentagens das áreas afetadas.

FIGURA 23 – EXEMPLO DE ANALISE GRÁFICA FEITA NO MATLAB, COM PASTILHA DE REFERÊNCIA A ESQUERDA. A) ANTES DE APLICAR O FILTRO E B) DEPOIS DE APLICAR O FILTRO COM L LIMITADO EM 75.

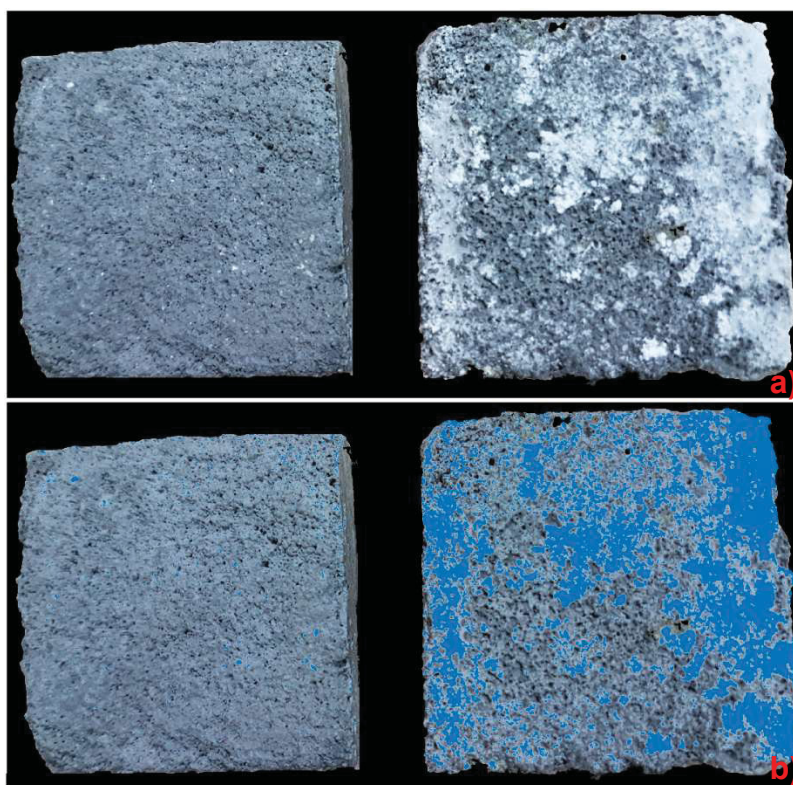


TABELA 10 – RESUMO DAS METODOLOGIAS DE ENSAIO ACELERADO UTILIZADAS

Metodologia	Temperatura	Altura de água	Pressão	Mecanismo de percolação	Base da Literatura
I (AS)	20 ± 2°C	3 mm S*	--	Capilaridade + Permeabilidade (Gravidade)	Xue e Quan (2015)
II (AR)	20 ± 2°C	5 mm PS*	--	Capilaridade	Quarcioni <i>et al.</i> (2003)
III (AR+CALOR)	20 ± 2°C (14h) + 40-45°C (10h)	5 mm PS*	--	Capilaridade	Quarcioni <i>et al.</i> (2003)
IV (CS)	20 ± 2°C	Cíclico	--	Capilaridade	Ritchie (1955)
V (COPO)	20 ± 2°C	80mm (Coluna d'água)	80mm de água	Capilaridade + Permeabilidade (Pressão água + Gravidade)	---
VI (G+AR)	5 ± 2°C (14h) + 40-45°C (10h)	5 mm PS*	--	Capilaridade	---
VII (G+CALOR)	20 ± 2°C	5 mm PS*	--	Capilaridade	---
VIII (POTE)	20 ± 2°C	150mm (Coluna d'água)	150mm de água	Capilaridade + Permeabilidade (Pressão água)	---

\*S =água superior e \*PS = parcialmente submerso

Entretanto, como o software consegue apenas analisar bidimensionalmente a quantidade de eflorescência, sem avaliar o seu volume, uma análise visual também foi implementada de forma complementar. Adicionalmente, após 28 dias dos ensaios acelerados, foi feita raspagem do material esbranquiçado formado para caracterização por meio de TGA e DRX.

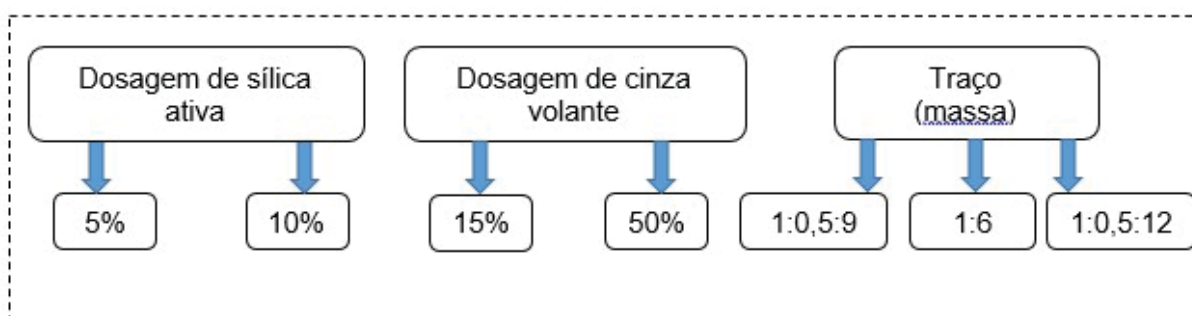
Dentre as oito condições de ensaio testadas nesta etapa, três foram escolhidas para serem aplicadas na etapa final deste estudo. Os resultados estão expostos no item 6.0, entretanto, adianta-se que as três metodologias que melhor conseguiram acelerar o aparecimento da eflorescência foram: COPO, POTE e A+C (Ar+Calor).

### 5.2.2. Estudo principal

O programa experimental desta etapa foi elaborado para permitir avaliar o efeito da adição de cinza volante e sílica ativa no aparecimento de eflorescência, bem como correlacionar o uso da cal com a ocorrência do mesmo fenômeno. Os parâmetros deste experimento foram manipulados um a um, visando possibilitar uma análise direta e sem interferência de outras variáveis. As variáveis desta fase do experimento estão demonstradas na Figura 24.

A unidade de análise desta pesquisa foram pastilhas de argamassa com dimensões de 50x50x25 mm (largura x base x altura) para os testes acelerados de eflorescência e fragmentos destas pastilhas para os testes de porosimetria por intrusão de mercúrio, termogravimetria (TGA) e DRX. Além disso, foram também moldados corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm para ensaio de absorção e tração na flexão e corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm para determinação de resistência à compressão.

FIGURA 24 – FATORES FIXOS E VARIÁVEIS DA PESQUISA



#### 5.2.2.1. Moldagem das pastilhas e corpos de prova

Nesta etapa do trabalho utilizou-se o traço de referência como sendo o 1:1:8 em volume (1:0,5:9 em massa). A razão para isso é o fato de que seria produzido nesta fase do experimento um traço sem a utilização de cal, contendo somente cimento e areia. A fim de manter a mesma relação água/finos e finos/materiais secos, caso o traço de referência do estudo preliminar (1:1:6 em volume ou 1:0,5:7 em massa) fosse utilizado, haveria a necessidade de produzir um traço sem cal em massa



de 1,5:7 ou, de forma unitária, 1:4,66. Levando-se em conta que o cimento utilizado é um CPV-ARI, com altas resistências, este traço geraria uma argamassa com resistência à compressão de mais de 20MPa. Por esta razão, optou-se por utilizar para o estudo principal um traço mais pobre (1:0,5:9 em massa) como traço de referência. Além disso, este mesmo traço já foi também utilizado em outros trabalhos (QUARCIONI *et al.*, 2003; BASTOS *et al.*, 2005; SILVA, 2006).

Adotou-se as dosagens de 15 e 50% de cinza volante com foco em simular o uso de um cimento do tipo CPII-Z e CPIV, respectivamente. A dosagem de 10% de sílica ativa foi escolhida devido a ser uma dosagem ótima encontrada na literatura (YOGENDRAN *et al.*, 1987; SAUTSOS e DOMONE., 1993; DUVAL e KADRI, 1998). Já o teor de 5% utilizou-se como um valor intermediário. Os traços finais, bem como as consistências obtidas estão apresentadas na Tabela 11. Os traços MCAL e SCAL foram calculados mantendo-se a relação finos/materiais secos e água finos. Ou seja, para o traço MCAL dividiu-se a quantidade de finos totais pelos dois aglomerantes, chegando-se a 0,75:0,75:9, ou 1:1:12 (unitário). Para o SCAL, o oposto foi realizado, somou-se o total de aglomerante do traço de referência, chegando-se a 1,5:9, ou 1:6(unitário).

TABELA 11 – TRAÇOS UTILIZADOS NA ETAPA FINAL.

Identif.	Traço Unitário	Cimento (g)	Cal (g)	Sílica Ativa (g)	Cinza Volante (g)	Areia (g)	Água (g)	Pó Xadrez (g)	Flow Table (cm)
REF	1:0,5:9	289	144	-	-	2.600	495	18	270
5SA	1:0,5:9	274	144	14	-	2.600	495	18	250
10SA	1:0,5:9	260	144	29	-	2.600	495	18	240
15CV	1:0,5:9	246	144	-	43	2.600	495	18	270
50CV	1:0,5:9	144	144	-	144	2.600	495	18	260
MCAL	1:1:12	289	289	-	-	3.462	659	24	280
SCAL	1:6	289	-	-	-	1.735	330	12	270



A água para este ensaio foi ajustada para a obtenção de um resultado no teste de mesa de consistência de 270 mm para a amostra de referência, conforme Figura 25. Escolheu-se esta abertura devido ao fato de se utilizar nesta etapa do experimento, traços com adições de sílica ativa, a qual usualmente aumenta a demanda de água devido a sua elevada finura. Por esta razão, optou-se por um traço um pouco mais fluido do que no estudo preliminar. Todos os traços apresentaram no final uma relação água/materiais secos de 0,163 e água/finos de 1,14. Determinou-se também as densidades e quantidade de ar incorporado de cada argamassa através do procedimento recomendado na NBR 13.278 (2005), gerando os resultados apresentados na Tabela 12. Analisando-se os resultados percebe-se que a introdução de materiais finos como a cinza volante e a sílica ativa geraram uma redução da quantidade de ar incorporado. Já as alterações na dosagem de cal apresentaram um menor impacto.

FIGURA 25 – RESULTADO DE 270MM NA MESA DE CONSISTÊNCIA



A mistura das argamassas seguiu o procedimento descrito na NBR 13.276 (2005). A moldagem das pastilhas se deu em uma única camada adensada através de 10 golpes com o soquete utilizado no teste de “flow table”. Já para a moldagem dos corpos de prova prismáticos, optou-se por não seguir a recomendação da NBR 13279:2005, visto que a utilização de uma mesa de queda geraria um adensamento superior ao encontrado em argamassas de obra. Por esta razão, seguiu-se o realizado por Capraro (2016), ou seja, adensamento através de 20 golpes de uma espátula fina com posterior alisamento da superfície. As patilhas e corpos de prova prismáticos moldados estão apresentados na Figura 26. Para moldagem dos corpos de prova cilíndricos, seguiu-se o procedimento descrito na norma NBR 7215 (1997), ou seja, através do enchimento do molde de 50x100mm em 4 camadas e com adensamento de cada uma delas com 30 golpes do soquete padrão. Por traço, foram moldados um total de 16 pastilhas, 3 corpos de prova prismáticos e 8 CPs cilíndricos.

TABELA 12 – DENSIDADE E TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS

Identif.	Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
REF	2,04	4,5
5%SA	2,05	3,9
10%SA	2,06	3,2
15%CV	2,04	4,1
50%CV	2,03	3,3
MCAL	2,02	4,2
SCAL	2,09	4,4

FIGURA 26 – PASTILHAS E CPS PRISMÁTICOS MOLDADOS



Todas as pastilhas e corpos de prova foram desformados após 24 horas. As pastilhas foram mantidas em câmara úmida durante 7 dias, com umidade de 95% e temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ . Os corpos de prova prismáticos foram mantidos também por 7 dias em câmara úmida e após este período, foram mantidos em condições ambiente até a realização do ensaio de absorção. Já os corpos de prova cilíndricos foram mantidos em câmara úmida durante 28 dias.

#### 5.2.2.2. Teste acelerado

Após 7 dias de cura em câmara úmida, as pastilhas tiveram suas superfícies superiores e inferiores lixadas para remover qualquer eflorescência que já possa ter sido formada dentro da câmara úmida, além de também remover a superfície vitrificada da moldagem com o uso de forma metálica. Após este processo, as laterais das pastilhas foram seladas com silicone neutro.

Baseado nos resultados do teste preliminar, escolheu-se três formas de aceleração da eflorescência para serem utilizadas nesta etapa do trabalho:

- I. Imersão de 5 mm das pastilhas em água destilada com regime cíclico de temperatura: ambiente a 22°C por 14 horas e exposição à radiação UV por 10h, a aproximada 40°C (condição “III” do teste preliminar) – “A+C”;
- II. Fixação de copos de isopor sem fundo na face superior das pastilhas, sendo estes copos preenchidos com uma altura de água de 80 mm (condição “V” do teste preliminar) – “COPO”;
- III. Pastilhas fixadas lateralmente a um pote plástico e este pote preenchido com 150 mm de água (condição “VIII” do teste preliminar”) – “POTE”.

As pastilhas foram fixadas ao copo de isopor e ao pote plástico com uma borracha termoplástica da marca Elastil. As condições de ensaio estão representadas na Figura 27.

FIGURA 27 – DISPOSIÇÃO DAS PASTILHAS NOS ENSAIOS



Para cada traço, quatro pastilhas foram sujeitas a cada uma das três condições de ensaio (AR+CALOR; COPO e POTE) e, adicionalmente, quatro pastilhas foram mantidas em condições de laboratório para serem posteriormente utilizadas como pastilhas de referência. As pastilhas foram mantidas nestas condições durante 28 dias. Semanalmente, as pastilhas foram fotografadas para documentar a evolução do aparecimento das eflorescências. Após 28 dias foi feita a raspagem das eflorescências formadas. Este material foi coletado e guardado para análises futuras.

Após estas raspagens, duas pastilhas foram novamente fotografadas e retornaram ao ensaio acelerado na condição COPO até a idade de 63 dias, para uma análise complementar do efeito da duração do ensaio.

Visando observar o efeito do grau de hidratação para a formação de eflorescência, realizou-se também o ensaio na metodologia COPO para pastilhas com 28 dias e 91 dias de idade, mantendo-as no ensaio acelerado pelos mesmos 28 dias. Estas pastilhas também foram curadas em câmara úmida por um período de 7 dias. Após este prazo, elas foram mantidas em condições ambiente. As pastilhas foram retiradas da câmara úmida para evitar que a úmida desta gerasse alguma lixiviação do hidróxido de cálcio das peças. A metodologia COPO foi selecionada para essas análises complementares porque foi a metodologia que mais gerou eflorescência, dentre as estudadas, conforme será discutido no capítulo de resultados mais adiante.

Da mesma maneira que no estudo preliminar, todas as fotografias foram realizadas de cada pastilha individualmente a uma distância de 10cm e sem utilização de flash. Estas imagens foram posteriormente utilizadas para a quantificação da eflorescência através do software MATLAB. Novamente estipulou-se um limite de luminosidade (L) de 75, a fim de conseguir satisfatoriamente isolar somente a eflorescência durante a análise. A área afetada foi posteriormente quantificada no mesmo software. Uma avaliação visual também foi realizada de maneira a complementar o resultado obtido no MATLAB, visto que há ainda a necessidade de se avaliar o volume das eflorescências formadas, o que não é possível por meio do software utilizado.

#### 5.2.2.3. Ensaio de absorção por capilaridade

Aos 28 dias, realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade, conforme a NBR 9779 (2012), nos corpos de prova prismáticos de 40x40x160mm. Optou-se, entretanto, por utilizar CPs destas dimensões, ao invés de CPs de 100x200 mm, devido ao volume de argamassa que seria necessário para produção destes corpos de prova maiores, tendo em vista que para todos os estudos deste trabalho utilizou-se argamassadeiras de laboratório para mistura. Foram utilizados para o ensaio de

absorção 3 CPs para cada traço estudado, totalizando 21 corpos de prova prismáticos.

Previamente ao ensaio, os CPs foram secos em estufa em temperatura de  $80 \pm 5^\circ\text{C}$  até a constância de massa. Optou-se em não utilizar a temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  da NBR 9779 (2012) para não haver o risco de microfissurar as argamassas, uma vez que estes mesmos CPs ainda seriam utilizados para os ensaios de resistência a tração na flexão. Neste ensaio, considerou-se a massa sendo constante quando a diferença entre pesagens de 2 horas era inferior a 0,5%. Na sequência, estes foram refrigerados em temperatura de laboratório de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24h e sua massa seca foi determinada.

A realização do ensaio consistiu em manter os corpos de prova em contato com uma lâmina de água constante de  $5 \pm 1$  mm e em pesar os CPs após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de contato com esta lâmina. Antes de cada pesagem removeu-se o excesso de água da superfície dos CPs com auxílio de um pano. Após a pesagem, os CPs retornavam ao contato com a lâmina de água até a próxima pesagem, ou final do ensaio.

A determinação do coeficiente de absorção por capilaridade é dada pela Equação 8:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (8)$$

Onde:

- C é a absorção por capilaridade – g/cm<sup>2</sup>;
- $m_{\text{sat}}$  é a massa saturada do CP com uma das faces em contato com a lâmina de água de 5mm – g;
- $m_s$  é a massa do corpo de prova logo após atingir a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  – g;
- S é a área da seção transversal em contato com a lâmina de água – cm<sup>2</sup>.

O objetivo da realização deste teste foi analisar se existe uma relação entre a absorção por capilaridade e a quantidade de eflorescência encontrada no ensaio acelerado.



#### 5.2.2.4. Ensaio de tração na flexão e compressão.

Para o teste de resistência a tração na flexão e a compressão utilizou-se para cada traço 3 CPs prismáticos de 40x40x160 mm e 3CPs cilíndricos de 50x100 mm, respectivamente. Ambos os ensaios foram realizados com idade de 28 dias.

O teste de resistência a tração na flexão foi executado com posicionamento dos corpos de prova na prensa e velocidade de carregamento conforme NBR 13279 (2005). Utilizou-se para esta ruptura uma prensa de 100 KN da marca EMIC.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados corpos de prova cilíndricos e seguiram o procedimento de ruptura da NBR 7215 (1997). Todos os CPs foram capeados com enxofre previamente à ruptura, com espessura máxima de 2mm. Utilizou-se para esta ruptura uma prensa de capacidade de 1000KN com velocidade de carregamento controlada automaticamente de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s.

#### 5.2.2.5. Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Aos 28 dias de idade, fragmentos de uma pastilha de cada traço (cubos de aproximadamente 10mm de aresta), sem estar sujeita ao teste acelerado, foram submetidos ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Este ensaio consiste basicamente na injeção de mercúrio sob pressão através da peça de argamassa. Visto que o mercúrio é um líquido não-molhante, ou seja, não tem a tendência de penetrar espontaneamente em meios porosos, há a necessidade da aplicação de pressão para que esta penetração ocorra. Registra-se o volume de mercúrio que penetrou na peça sob uma dada pressão, sendo possível, então, a obtenção de uma curva.

O equipamento utilizado para o teste foi o Quabtachrome, modelo Poremaster 33, com capacidade de aplicação de pressão máxima de intrusão de mercúrio de 33.000Psi e de detecção de poros com até 0,00064 microns de diâmetro.

Os cálculos subsequentes foram realizados conforme a norma ASTM D4404 (2010), considerando tensão superficial do mercúrio de 0,485 N/m, densidade de 13,5335g/cm<sup>3</sup> e ângulo de contato mercúrio/sólido de 130°.

Este ensaio teve como objetivo avaliar se existe uma relação entre a porosidade da argamassa e a quantidade de eflorescência formada.

#### 5.2.2.6. Ensaio de termogravimetria (TGA)

Ambos, o material esbranquiçado formado durante o ensaio acelerado e a argamassa da superfície da pastilha de referência (sem eflorescência), foram sujeitos ao ensaio de termogravimetria. Foram ensaiados os dois materiais para conseguir demonstrar se há uma diferença na quantidade de hidróxido e carbonato de cálcio na amostra do material da eflorescência, frente a argamassa propriamente dita.

A análise termogravimétrica é uma técnica que mede a variação de massa de uma amostra em relação ao incremento da temperatura até valores pré-definidos. Esta técnica permite visualizar, no caso da argamassa, perdas de massa em temperatura conhecidas e que são referentes a evaporação da água, decomposição do hidróxido de cálcio, dentre outras. Para este ensaio foi utilizado cerca de 1 g de material peneirado na malha 0,075 mm, o qual foi colocado sobre um cadinho de níquel e suspenso por uma haste de alumina em balança eletrônica de sensibilidade de 0,01 g. O equipamento operou com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1.100 °C. A temperatura foi medida por um termopar do tipo K com isolamento mineral e bainha de níquel. O equipamento deste ensaio foi o da BP Engenharia, modelo RB-3000, localizado no laboratório de construção civil da UTFPR.

Também foi realizado ensaio de TGA na cal hidratada utilizada para este estudo, visando observar a presença de óxidos de magnésio. A existência deste composto foi percebida em cales da região de Curitiba por Macioski (2017). Este resultado já foi apresentado na Figura 17 deste mesmo capítulo.



#### 5.2.2.7. Ensaio de difração de Raio-X

A identificação das fases cristalinas do material esbranquiçado formado no ensaio acelerado de eflorescência foi realizada no Laboratório de Mecânica da UTFPR por meio de um difratômetro de Raio-X (Shimatzu Co., modelo XDR-7000). As varreduras foram realizadas com velocidade angular de 0,02 °C por segundo e com intervalo entre ângulos de Bragg de 5° a 80°. Utilizou-se aproximadamente 2 g de material passante na peneira nº 200 (abertura 0,075µm) para realização deste teste.

#### 5.2.3. Análise Estatística

A principal variável de resposta deste trabalho é a quantidade de eflorescência gerada através dos ensaios acelerados, tanto na etapa preliminar, quanto na etapa final. Ensaio complementares como resistência à compressão, absorção e resistência a tração na flexão também receberam tratamento estatístico. Apenas os ensaios de porosimetria de mercúrio, TGA e DRX não receberam este tratamento, visto que foi realizada somente uma análise com cada amostra. Não foi possível realizar ensaios de porosimetria de mercúrio nas 112 pastilhas testadas devido a impossibilidade do laboratório em realizar tamanha quantidade de ensaios.

Dos resultados que foram tratados estatisticamente, primeiramente foi feita uma eliminação dos valores espúrios, com foco em reduzir resíduos estatísticos. Valores extremos, não contidos na distribuição de Gauss foram descartados.

Utilizou-se para o tratamento estatístico o método de variância ANOVA (*one-way analysis of variance*) para avaliar se existe diferença significativa, de uma forma geral, entre todos os testes realizados. Na sequência realizou-se uma comparação múltipla de médias para determinar se há diferença entre cada um dos grupos estudados, dois a dois. Considerou-se para a análise um nível de significância de 95%

O método de comparação múltipla de médias utilizado nesta pesquisa foi o sugerido por Riberio e Caten (2003), no qual calcula-se primeiramente o desvio padrão das médias ( $S_{\bar{y}}$ ) a partir da Equação 9:

$$S_{\bar{y}} = \frac{\sqrt{MQR}}{\sqrt{n_c}} \quad (9)$$

Onde:

- MQR é a média quadrática dos resíduos, calculada pelo método ANOVA;
- $n_c$  é a média da quantidade de leituras dentro de cada grupo.

Com o valor de  $S_{\bar{y}}$  calculado, multiplica-se este valor por 3 para se obter o limite de decisão. Este valor 3 é proveniente da distribuição de Gauss, na qual a uma distância de 3 desvios da média se obtém 99,73% dos resultados.

## 6. RESULTADOS

Neste item estão apresentados primeiramente os resultados do estudo preliminar, o qual definiu as metodologias de ensaio acelerado que mais geraram eflorescência. Posteriormente, são demonstrados os resultados do estudo principal com as três metodologias de ensaio definidas anteriormente e, por último, os resultados da análise do tempo de duração do ensaio acelerado e do efeito do grau de hidratação.

Os resultados de ensaios complementares, como resistência à tração na flexão, resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio e absorção de água também são apresentados neste capítulo.

### 6.1. ENSAIO PRELIMINAR

Após a execução das propostas de ensaios acelerados durante 28 dias, as fotografias de cada uma das pastilhas foram tratadas no software MATLAB, conforme exemplificado na Figura 28, onde “a” é a pastilha original, “b” a imagem tratada com L definido em 75 e “c” a máscara gerada para quantificação das áreas. A Figura 29 representa as imagens das eflorescências formadas, onde REF é a pastilha de referência que não foi sujeita ao ensaio acelerado. Já na Figura 30 estão apresentados os valores encontrados de porcentagem da área afetada pela eflorescência em cada uma das pastilhas.

FIGURA 28 – EXEMPLO ANALISE MATLAB: A) PASTILHA ORIGINAL; B) PASTILHA TRATADA COM L LIMITE DE 75; E C) MASCARA GERADA PARA QUANTIFICAÇÃO DAS ÁREAS

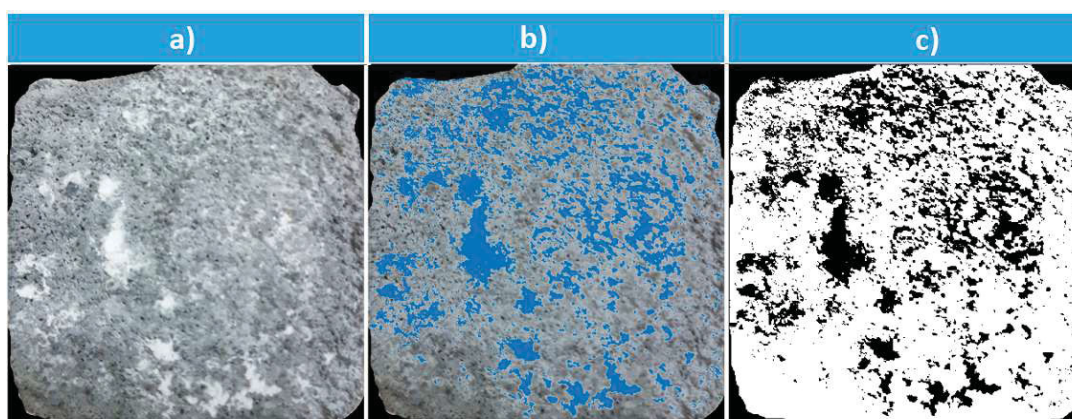


FIGURA 29 – RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS AOS 28 DIAS.

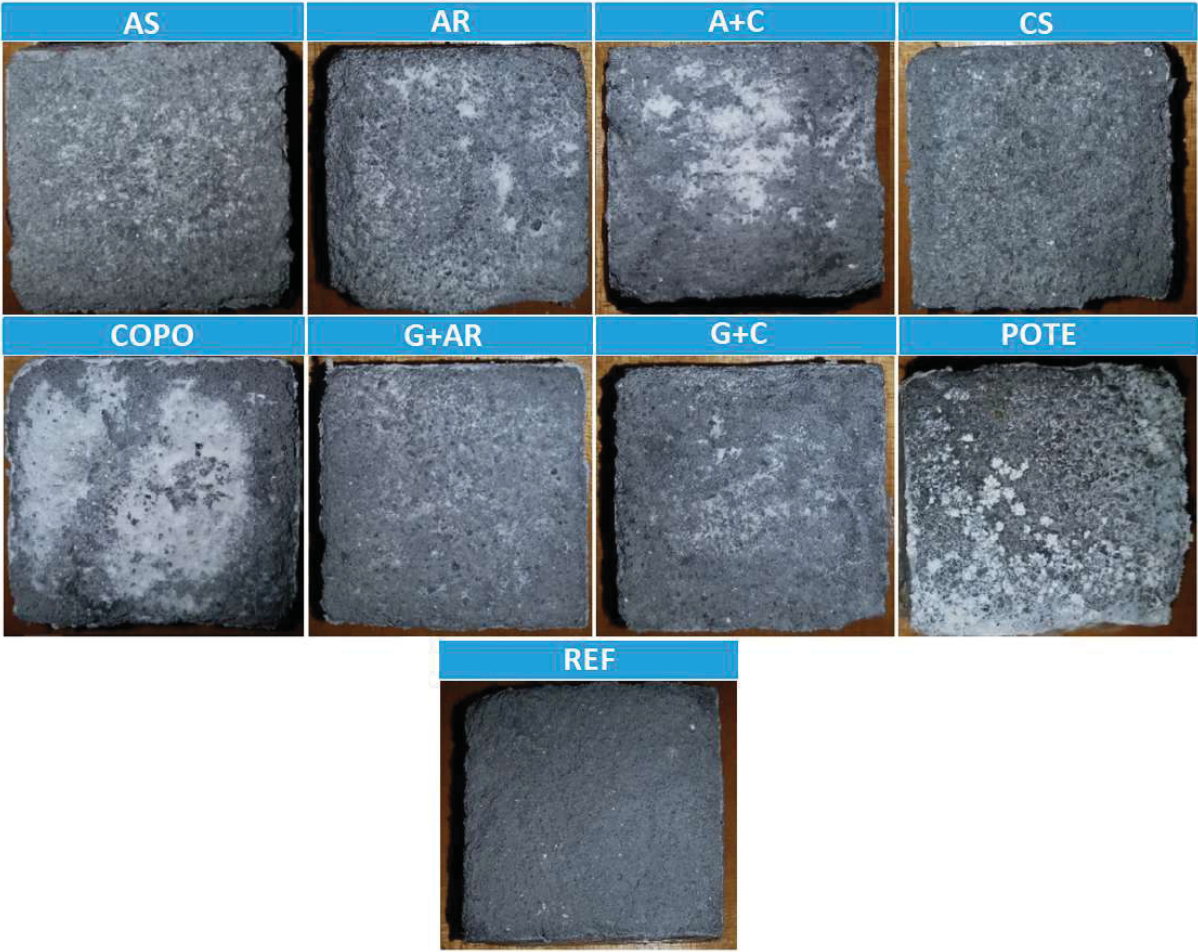
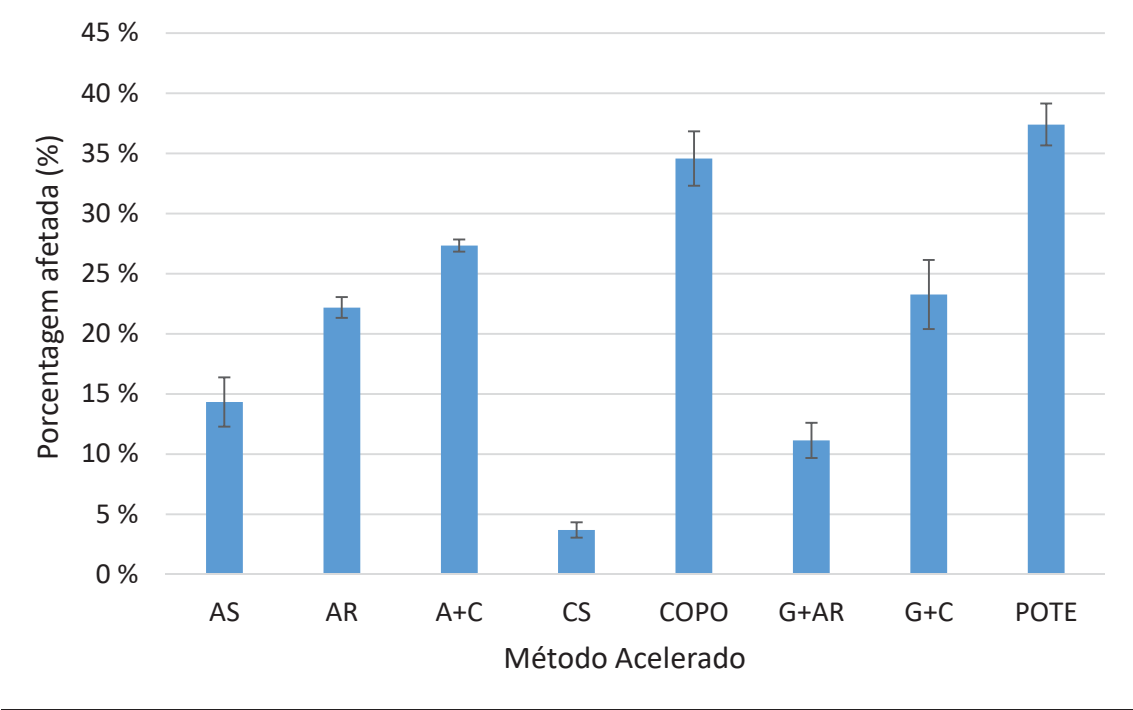


FIGURA 30 – ÁREA AFETADA PELA EFLORESCÊNCIA EM CADA METODOLOGIA



Durante a execução do ensaio preliminar, notou-se o aparecimento das eflorescências de forma predominante até os 7 primeiros dias de ensaio. A velocidade de aparição desta manifestação patológica foi reduzindo à medida que o ensaio avançou. A partir dos 14 dias já não se notou nenhum incremento significativo, como pode ser observado na Figura 31. Isso possivelmente ocorreu pela colmatação dos poros pela eflorescência no decorrer do ensaio, reduzindo gradativamente a permeabilidade das argamassas.

FIGURA 31 – EVOLUÇÃO DA EFLORESCÊNCIA COM O TEMPO



Os resultados da quantidade de eflorescência formada foram tratados estatisticamente através do método ANOVA, conforme apresentado na Tabela 13. Como pode ser visto, o valor de  $F$  (32,94) é maior que o valor de  $F_{\text{crítico}}$  (2,65), ou seja, há uma diferença estatística entre os métodos acelerados escolhidos para a fase preliminar deste experimento.

Seguidamente, analisando-se cada metodologia duas a duas através da análise múltipla de médias, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 14. O limite de decisão foi calculado conforme sugerido por Ribeiro e Caten (2003) e teve o valor de 6,04. Portanto, qualquer diferença de média maior do que 6,04 significa que há uma diferença estatística entre os dois métodos.

TABELA 13 – APLICAÇÃO DO MÉTODO ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2803,83	7	400,54	32,94	2,41E-08	2,65
Dentro dos grupos	194,55	16	12,15			
Total	2998,39	23				

Praticamente todos os métodos de ensaio testados neste trabalho apresentaram resultados estatisticamente diferentes, exceto entre os seguintes:

- AS e G+AR
- G+C e AR
- POTE e COPO

TABELA 14 – APLICAÇÃO DA ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS (PARTE 01/02)

PARES ANALISADOS	DIFERENÇA DAS MÉDIAS	RELEVÂNCIA
AS - AR	7,86	SIM
AS - A+C	15,95	SIM
AS - G+AR	3,19	NÃO
AS - G+C	8,93	SIM
AS - CS	10,63	SIM
AS - COPO	20,16	SIM
AS - POTE	23,07	SIM
AR - A+C	8,09	SIM
AR - G+AR	11,05	SIM
AR - G+C	1,07	NÃO
AR - CS	18,49	SIM
AR - COPO	12,30	SIM
AR - POTE	15,21	SIM
A+C - G+AR	19,13	SIM
A+C - G+C	7,01	SIM
A+C - CS	26,57	SIM
A+C - COPO	7,17	SIM
A+C - POTE	7,13	SIM
G+AR - G+C	12,12	SIM
G+AR - CS	7,44	SIM
G+AR - COPO	23,35	SIM
G+AR - POTE	26,26	SIM
G+C - CS	19,56	SIM
G+C - COPO	11,23	SIM



TABELA 14– APLICAÇÃO DA ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS (PARTE 02/02)

PARES ANALISADOS	DIFERENÇA DAS MÉDIAS	RELEVÂNCIA
G+C- POTE	14,14	SIM
CS - COPO	30,80	SIM
CS - POTE	33,71	SIM
COPO - POTE	2,91	NÃO

Além disso, através da análise concomitante dos resultados apresentados na Tabela 13 e das fotografias realizadas, os seguintes aspectos podem ser discutidos:

- a) A condição de ensaio A+C gerou uma eflorescência mais volumosa do que praticamente todos os demais ensaios, exceto sob as condições “POTE” e “COPO”;
- b) A utilização de temperatura de geladeira por 14h (condições G+AR e G+C) ao invés de manutenção ao ar (condições AR e A+C) gerou uma menor quantidade de eflorescência. Possivelmente isso tenha ocorrido devido ao fato de haver um incremento de solubilidade do hidróxido de cálcio sob temperaturas baixas. Este fato pode ter implicado em uma lixiviação deste composto para a lâmina de água, ao invés de auxiliar na sua dissolução na água dos poros e facilitar a sua ascensão na forma de eflorescência.
- c) A utilização de calor (condições A+C e G+C) contribuiu para o aparecimento de maiores eflorescências. Isso ocorreu devido ao fato de o calor gerar uma evaporação acelerada da água que ascende por capilaridade. Neste ensaio, conforme comentado anteriormente, a temperatura foi mantida em 40°C na superfície da peça, diferentemente do realizado por Quarcioni *et al.* (2003) que manteve uma temperatura de cerca de 80°C. Durante a execução do ensaio desta dissertação, percebeu-se que temperaturas acima de 40°C levavam a uma evaporação excessiva de água, gerando uma superfície seca nas pastilhas. Este fato pode levar ao aparecimento de criptoflorescências, ao invés de eflorescências visíveis, o que dificultaria a sua quantificação.
- d) Os ensaios “AS” e “CS” foram os que menos causaram o aparecimento de eflorescência. Possivelmente isto ocorreu devido ao fato de estas duas metodologias gerarem um menor número de ciclos de evaporação nas superfícies das peças. No caso “AS”, era necessária toda a água evaporar para



esta ser recolocada, o que demorava mais de 24h. Isso reduziu o número de vezes que a água da superfície evaporou e sedimentou carbonato de cálcio. Já sob a situação “CS”, somente a quantidade de água que a pastilha era capaz de absorver durante o período de 12h era posteriormente passível de evaporação. Isso ainda sem garantir que qualquer sedimentação de carbonato de cálcio ocorreria na superfície, e não no interior da argamassa, formando criptoflorescências. Nos demais casos as peças estavam constantemente sujeitas a evaporação e a permeabilidade de água, seja por percolação (COPO e POTE) ou seja por capilaridade (demais casos).

- e) As condições de ensaio COPO e POTE foram as que geraram maiores áreas afetadas pela eflorescência, além de também produzirem, visivelmente, o aparecimento de cristais mais volumosos. Isso possivelmente ocorreu devido a pressão de água aplicada, a qual tende a gerar uma percolação de água forçada, levando a um maior carreamento de sais. Nas demais condições de ensaio, era responsabilidade somente da capilaridade o carreamento de sais para a superfície, conforme apresentado anteriormente na Tabela 10.
- f) Dentre as condições COPO e POTE, nota-se que a condição COPO aparenta ser a mais adequada, uma vez que, pela pastilha estar na horizontal durante o ensaio, ocorre uma distribuição mais uniforme da eflorescência na superfície desta. Na condição POTE, as pastilhas se encontram na vertical, fato que faz com que haja uma predominância de eflorescência na parte inferior da pastilha, conforme pode ser visualizado na Figura 29.

Dessa forma, as condições Ar+Calor, COPO e POTE foram as que ocasionaram o aparecimento de maior quantidade de eflorescência e serão as condições adotadas para o estudo principal.

## 6.2. TERMOGRAVIOMETRIAS (TGA)

Nas Figuras 32 e 33 estão apresentados, respectivamente, os resultados da TGA realizada com a argamassa de referência, sem ter sido colocada sob qualquer ensaio acelerado, e com o material esbranquiçado formado pelo ensaio acelerado.

FIGURA 32 – TGA DA ARGAMASSA DE REFERÊNCIA

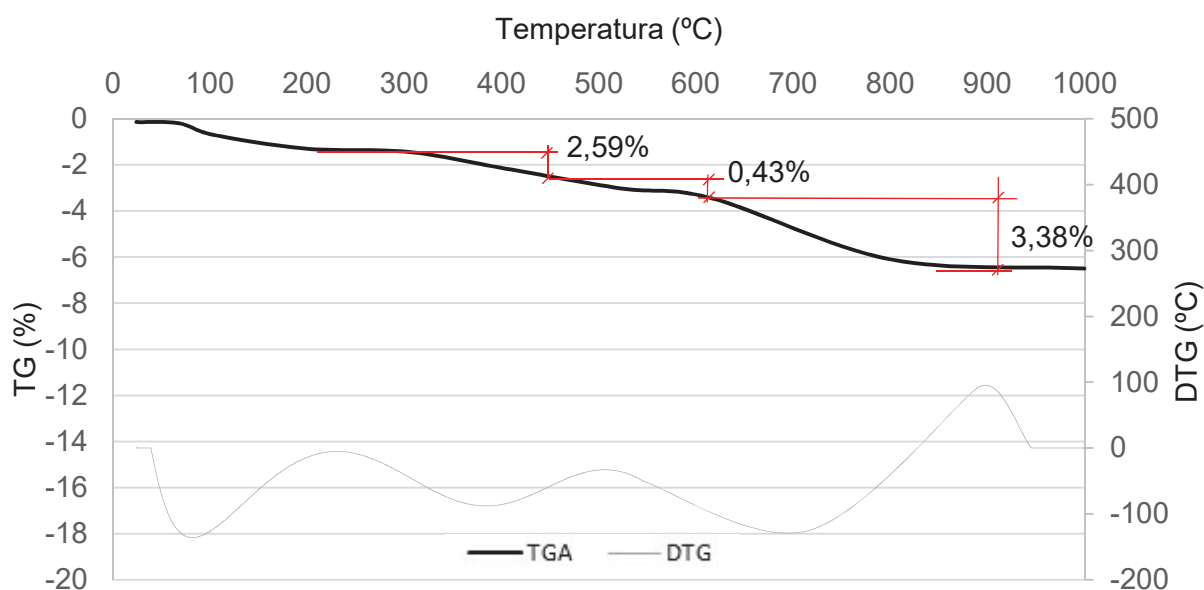
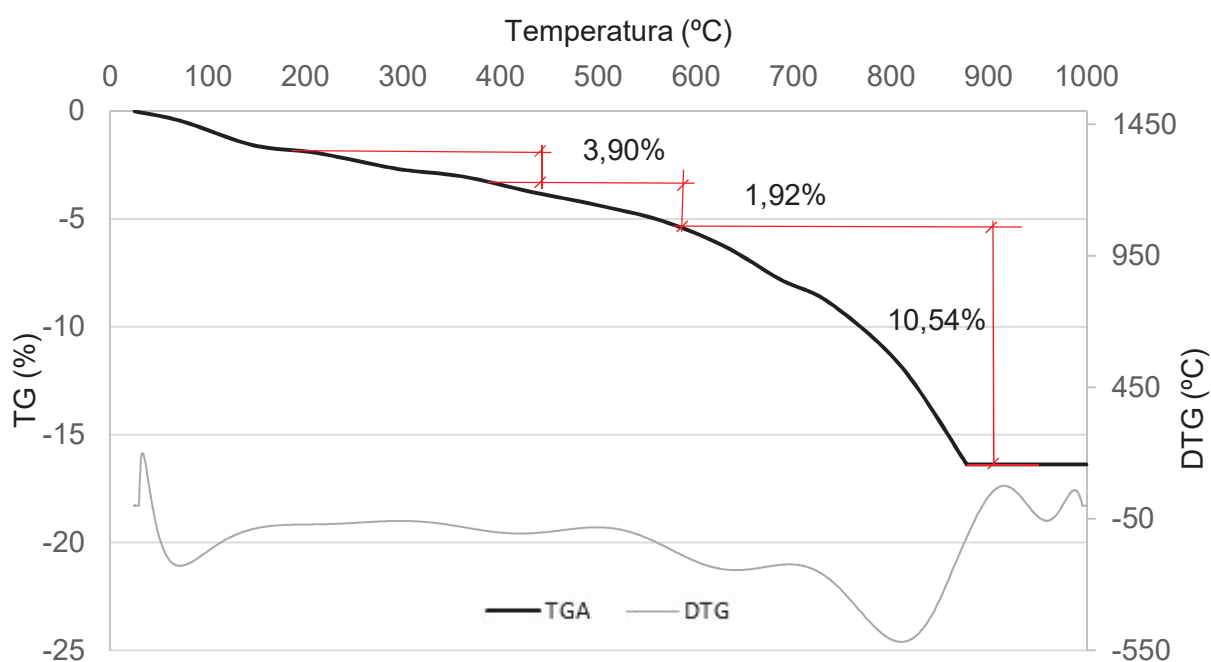


FIGURA 33 – TGA DO MATERIAL DA EFLORESCÊNCIA



Nas Figuras 32 e 33 foram marcados os percentuais das perdas entre as temperaturas de 200 e 450°C, 450 e 605°C e 605 e 1000°C, as quais correspondem, a decomposição do hidróxido de magnésio (APHENE, 2007), hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, respectivamente (TAYLOR, 1997).

Como pode-se perceber, o material esbranquiçado apresentou uma perda muito maior do que a argamassa de referência entre as temperaturas de 500 e 1000°C. Isto indica que há neste material uma quantidade significativamente superior de carbonato de cálcio, indicando que este é preponderantemente o material da eflorescência.

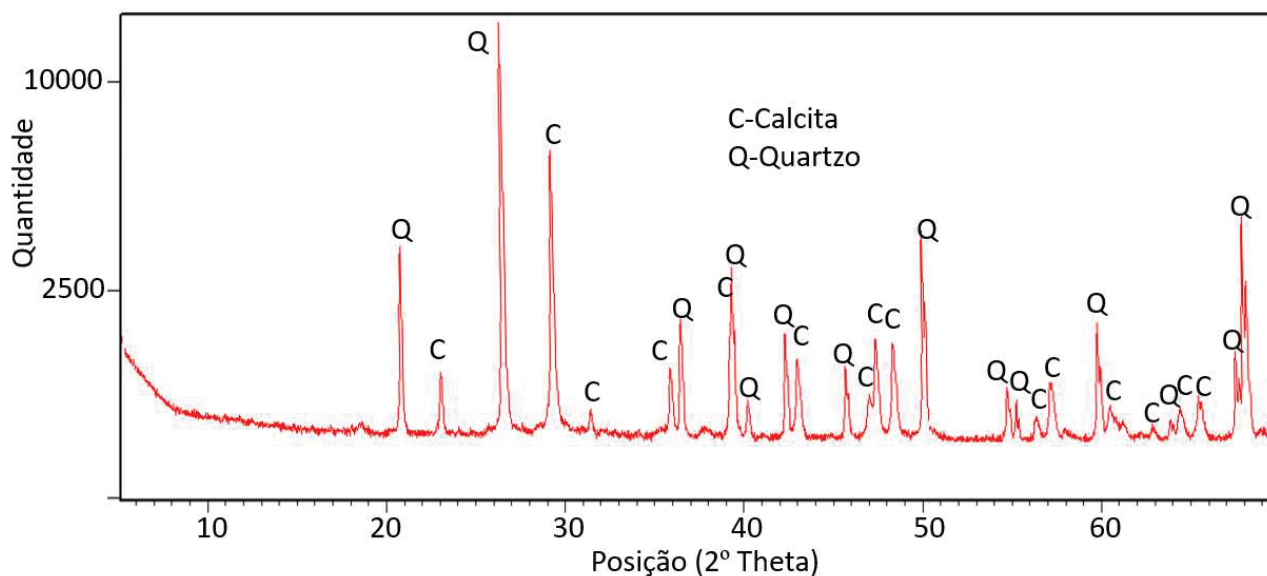
Como a eflorescência é somente uma fina camada formada sobre a argamassa, isso tornou impossível a raspagem somente deste material em quantidade suficiente para a realização do ensaio de TGA. Por esta razão, este material ensaiado possuía também quantidades consideráveis de quartzo (areia). Este fato pode ter feito com que a perda de 10% encontrada para a temperatura correspondente ao carbonato de cálcio não fosse maior.

Foram notados incrementos nos teores de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, de 0,43% para 1,92% e de 2,59% para 3,90%, respectivamente. Isto indica que parte da cal hidratada foi carregada para a superfície e que esta ainda não carbonatou. Entretanto, conforme esperado, estes incrementos foram muito menores do que o aumento da perda de carbonato de cálcio, de 3,38% para 10,54%. Este fato indica que o material preponderante na eflorescência gerada é o carbonato de cálcio.

### 6.3. DIFRAÇÃO DE RAIO-X (DRX)

Com foco em comprovar através de outra técnica, além da TGA, a predominância de carbonato de cálcio no material branco da eflorescência, foi realizado o ensaio de difração de Raio-X. Conforme pode ser visto na Figura 34, além de carbonato de cálcio, também foi identificado no ensaio a presença de quartzo. Este material é areia proveniente da raspagem da argamassa para retirada do material esbranquiçado. A presença de ambos os materiais está de acordo com o que era esperado como resultado deste ensaio e confirmam, novamente, a hipótese de formação de carbonato de cálcio.

FIGURA 34 – DRX DO MATERIAL DA EFLORESCÊNCIA



#### 6.4. ESTUDO PRINCIPAL

Para facilitar a compreensão dos resultados desta etapa do trabalho, estes foram divididos em dois grupos, o primeiro com foco em analisar o efeito da dosagem de cal sobre o aparecimento da eflorescência e o segundo, visando observar se a utilização de pozolanas (sílica ativa e cinza volante) efetivamente interfere na ocorrência desta manifestação patológica. Em ambas as etapas, é realizada uma análise concomitante das três metodologias de aceleração aplicadas (AR+Calor, Pote e Copo). Adicionalmente, ao final, são demonstrados os resultados do efeito do tempo de duração do ensaio e do grau de hidratação na eflorescência.

Com base nas caracterizações previamente realizadas destes materiais e suas dosagens em cada traço, é possível calcular a quantidade teórica de hidróxido de cálcio remanescente em cada um destes traços. Utilizando-se a Equação 10 (HOPPE FILHO, 2008), calcula-se a quantidade de hidróxido de cálcio presente na cal com base no ensaio da termogravimetria realizada, o qual apresentou uma perda de 13,56% entre 450 e 600°C (ver Figura 17). Desta maneira, chega-se a um percentual de hidróxido de cálcio de 55,7%.

$$Ca(OH)_2 = \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} \cdot H_2O = \frac{74}{18} \cdot 13,56 = 55,7\% \quad (\text{Eq. 10})$$

$Ca(OH)_2$ - teor de Portlandita (%);

$M_{Ca(OH)_2}$  - massa molecular da Portlandita (= 74, segundo MILLS *et al.*, 1993);

$M_{H_2O}$  - massa molecular da água (= 18, segundo MILLS *et al.*, 1993);

$H_2O$ - perda de massa referente a decomposição da portlandita (%).

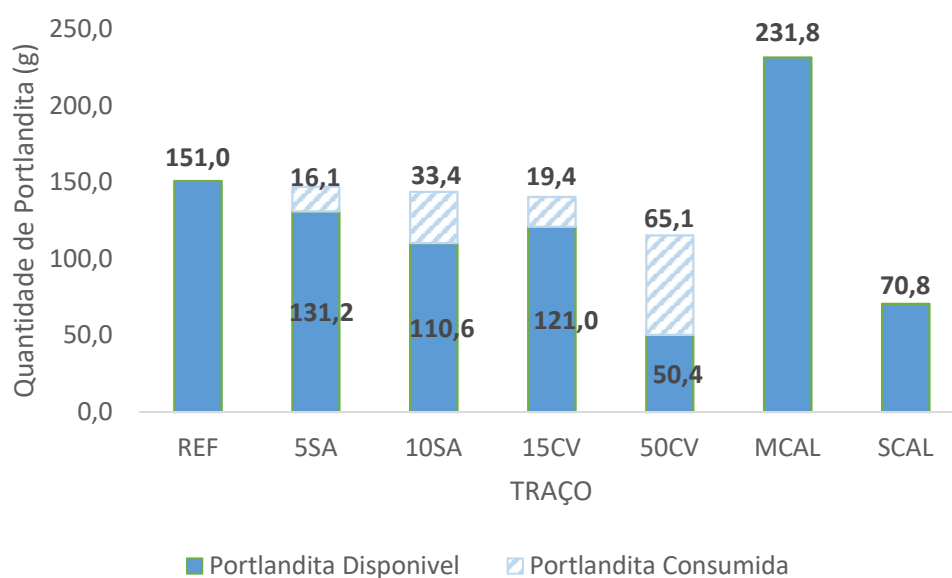
Sabe-se também que o clínquer possui 61,56% de  $C_3S$  e 13,88% de  $C_2S$  (ver Tabela 4) e que o cimento utilizado é composto por 92% de clínquer. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$  geram cerca de 39% e 18% de hidróxido de cálcio, respectivamente. A sílica ativa e a cinza volante utilizadas apresentam, segundo resultado indicado na Tabela 7, um consumo de hidróxido de cálcio de 1157 mg  $Ca(OH)_2/g$  e 452 mg  $Ca(OH)_2/g$ , respectivamente.

Mediante este contexto, na Tabela 16 e Figura 35 estão apresentados os valores teóricos calculados de hidróxido de cálcio liberado em cada um dos traços utilizados, bem como os respectivos consumos pelas pozolanas. É importante ressaltar que a nomenclatura SCAL refere-se ao traço sem uso de cal hidratada e MCAL o traço com o dobro da dosagem de cal. Como pode-se perceber, o traço que gerou uma menor quantidade de hidróxido de cálcio final foi o 50CV, uma vez que se tem uma menor quantidade de cimento e, ao mesmo tempo, uma maior dosagem de adição pozolânica. Contudo, nota-se que em nenhum dos casos houve um completo consumo do hidróxido de cálcio, indicando que qualquer um dos traços ainda possuem chances de gerar eflorescência, desde que haja um fluxo de água gerando lixiviação.

TABELA 15 – VALORES TEÓRICOS DE LIBERAÇÃO E CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

TRAÇO	Traço utilizado (g)				Hidróxido de Cálcio liberado (g)				
	Cimento	Cal	S.A.	C.V.	Cimento	Cal	S.A.	C.V.	Total
REF	289	144	-	-	70,8	80,2			151,0
5SA	274	144	14	-	67,1	80,2	(-16,1)		131,2
10SA	260	144	29	-	63,7	80,2	(-33,4)		110,6
15CV	246	144	-	43	60,3	80,2		(-19,4)	121,0
50CV	144	144	-	144	35,3	80,2		(-65,1)	50,4
MCAL	289	289	-	-	70,8	161,0			231,8
SCAL	289	-	-	-	70,8	0,0			70,8

FIGURA 35 – QUANTIDADE DE PORTLANDITA EM CADA TRAÇO



Os resultados apresentados nos próximos itens deste capítulo para análise do efeito da dosagem de cal e da adição pozolânica no aparecimento da eflorescência serão também relacionados com os teores calculados de hidróxido de cálcio apresentados na Tabela 15.

#### 6.4.1. Efeito da dosagem de cal

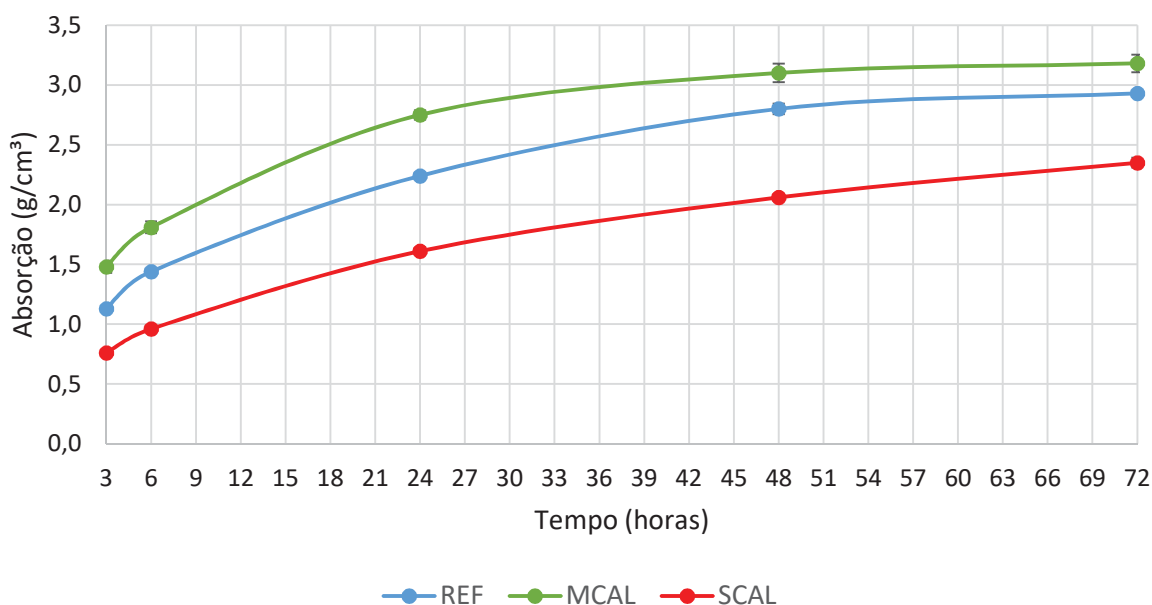
Ensaio complementares de absorção, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e porosimetria de mercúrio foram realizados com foco em auxiliar na justificativa dos resultados do impacto da cal na formação de eflorescência.

Estes ensaios complementares serão demonstrados anteriormente aos resultados dos ensaios acelerados de eflorescência, para facilitar a compreensão.

#### a) Absorção

Pode-se notar na Figura 36 que o incremento da dosagem de cal e uma consequente redução do teor de cimento, levou a um aumento da absorção em todas as idades. Este fenômeno já foi observado por outros autores (SILVA e CAMPITELI, 2006; ARANDIGOYEN e ALVAREZ, 2006; SAMIEI *et al*, 2015) e pode ser justificado devido ao aumento da relação água/cimento, fato que cria uma matriz menos densa, com menor quantidade de cristais oriundos da reação do cimento, e com maior absorção (MARTYS e FERRARIS, 1997).

FIGURA 36 – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE DAS ARGAMASSAS – EFEITO DA CAL



Realizando-se o tratamento estatístico dos resultados de absorção obtidos, através do método ANOVA (Tabela 20 apresentada na seção “Anexo” deste trabalho) e da análise múltipla de médias (Tabelas 16), observa-se que efetivamente há uma diferença estatística entre estes resultados. Para o método de análise múltipla de médias o limite de decisão calculado foi de 0,18g/cm².

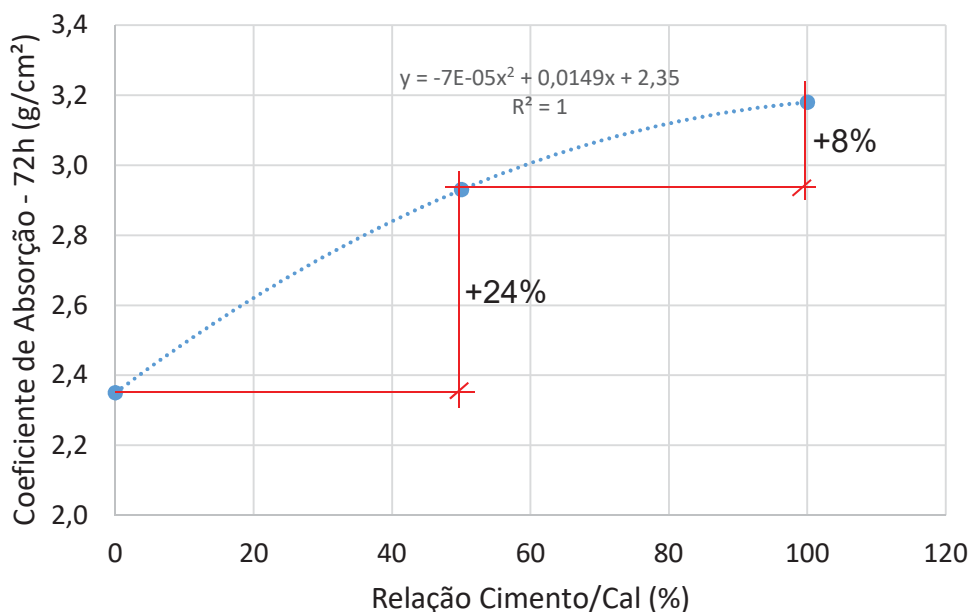


TABELA 16 – ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Pares Analisados	DIFERENÇA	RELEVANTE (Dif > Fcrit*)
REF – MCAL	0,317	SIM
REF - SCAL	0,585	SIM
MCAL - SCAL	0,902	SIM
*Fcrit = 0,18		

Traçando-se uma correlação entre o coeficiente de absorção em 72 h e a relação entre a quantidade de cal e a quantidade de cimento, conforme apresentado na Figura 37, pode-se observar que a retirada da cal apresentou um maior impacto na absorção do que o seu aumento. Possivelmente isso tenha ocorrido devido ao fato de que entre o traço de REF e MCAL há um aumento de cerca de 33% na relação água/cimento, enquanto entre o traço REF e SCAL há uma redução de 50% nesta relação. Como já comentado anteriormente, o cimento é o principal responsável pela densidade da matriz, este maior impacto na relação a/c leva também a uma maior alteração na absorção.

FIGURA 37 – CORRELAÇÃO ENTRE QUANTIDADE DE CAL E ABSORÇÃO



### b) Resistência à tração na flexão e à compressão

Nas Figuras 38 e 39 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, respectivamente.

Como pode ser visto, tanto a resistência à tração na flexão, quanto a resistência à compressão decaíram com o aumento do teor de cal e consequente redução do teor de cimento, como esperado. Esta redução é justificada pelo aumento da relação a/c e pelo fato da cal contribuir pouco para a resistência mecânica das argamassas. Por esta razão, também se notou um maior impacto nas resistências com a eliminação da cal do que com o seu aumento. Esta redução das resistências mecânicas geradas pela adição de cal já foi observada por diversos outros autores (SILVA e CAMPITELI, 2006; SILVA, 2006; ARANDIGOYEN e ALVAREZ, 2007).

FIGURA 38 – RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO – EFEITO DA CAL

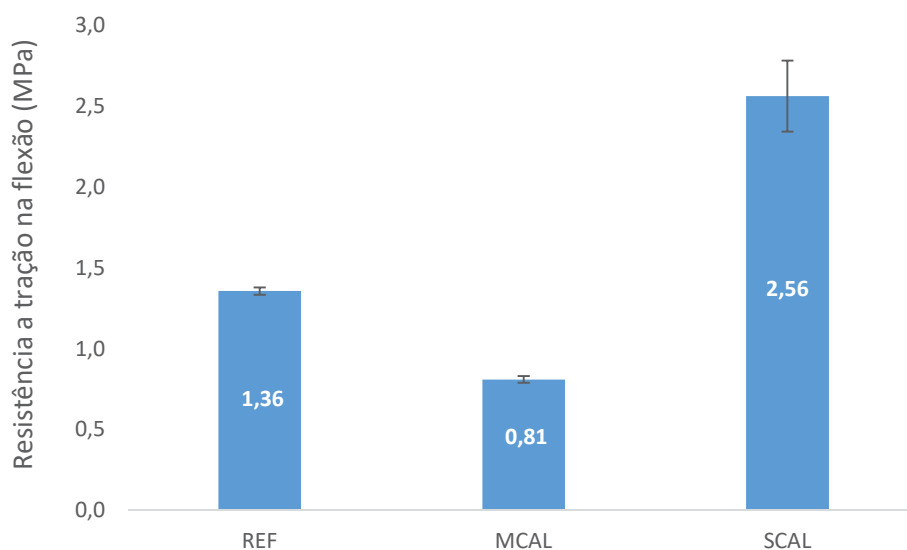
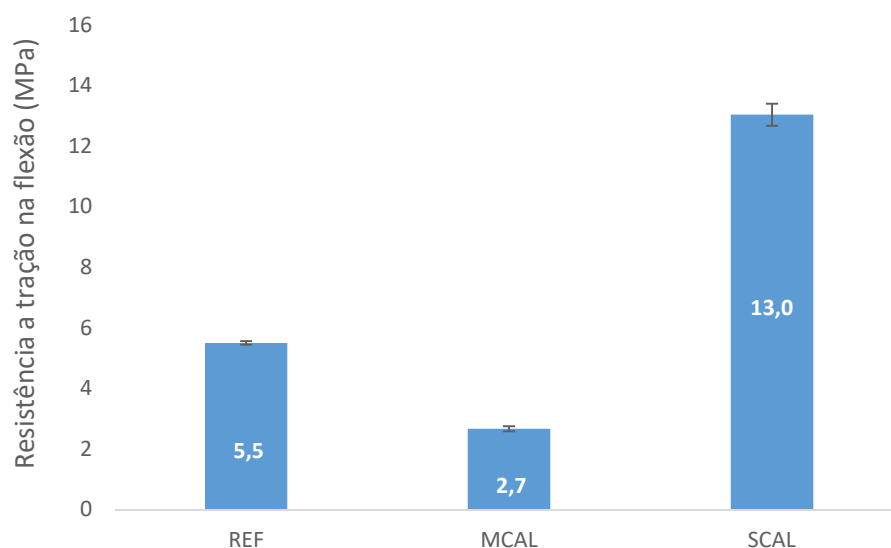


FIGURA 39 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – EFEITO DA CAL

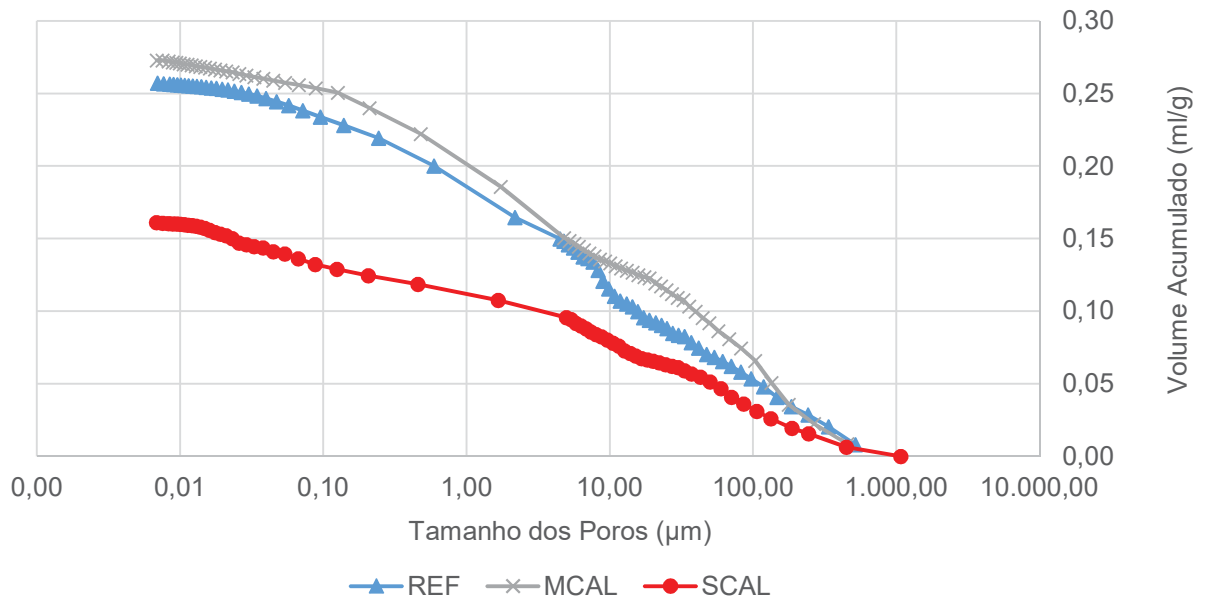


#### c) Porosimetria por intrusão de Mercúrio

Conforme pode-se observar na Figura 40, o incremento de cal levou a uma maior porosidade total da amostra. Este incremento da porosidade com o aumento da adição de cal também já foi notado por Arandigoyen e Alvarez (2006). Segundo estes autores, a principal razão por esta diferença é a maior quantidade de cristais de C-S-H formados quando se tem uma maior dosagem de cimento, fato que permite a criação de uma matriz cimentícia mais densa.

Da mesma forma que nos resultados de resistência e de absorção, nota-se que houve uma maior alteração na porosidade das argamassas com a eliminação completa da cal do que com o seu aumento. O resultado de porosimetria por intrusão de mercúrio corrobora o que foi anteriormente comentado de que a retirada da cal gera uma maior impacto na relação a/c do que o seu aumento, levando, portanto, a formação de uma matriz mais densa.

FIGURA 40 – POROSIMETRIA DE MERCÚRIO – PASTILHAS ANTES DO ENSAIO ACELERADO



#### d) Ensaio acelerado de eflorescência

Após 7 dias de cura e 28 dias de ensaio acelerado, pode-se notar que o incremento da dosagem de cal levou a um aumento da quantidade de eflorescência formada. Este fato pode ser observado através das três metodologias utilizadas e cujos resultados estão apresentados nas Figuras 41 a 43. Contudo, esta diferença se torna mais visível nas metodologias POTE e COPO, as quais permitiram uma maior formação de eflorescência.

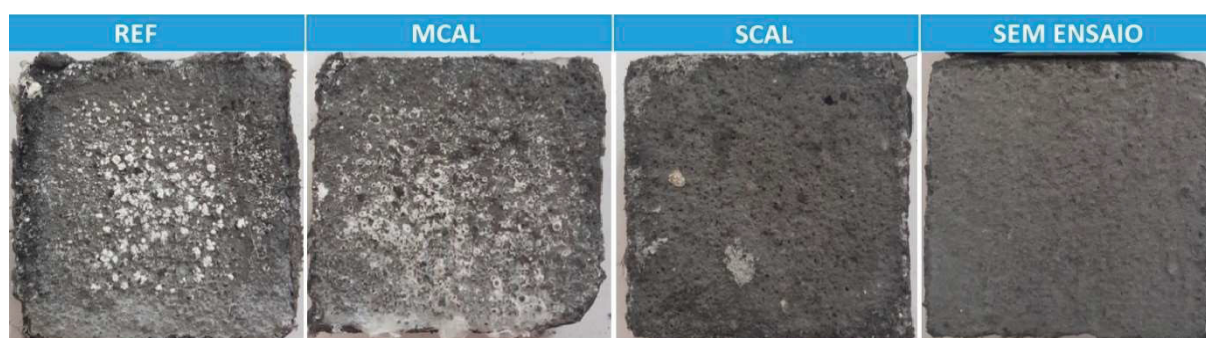
FIGURA 41 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA AR+CALOR - EFEITO DA CAL



FIGURA 42 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA COPO – EFEITO DA CAL



FIGURA 43 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA POTE – EFEITO DA CAL



Da mesma forma que foi realizado no ensaio preliminar, após os ensaios, as fotografias de cada uma das pastilhas foram tratadas no software MATLAB, conforme já anteriormente explanado. Os valores encontrados de porcentagem da área afetada pela eflorescência em cada uma das pastilhas estão apresentados nas Figuras 44 a 46.

FIGURA 44 – RESULTADOS NA METODOLOGIA A+C

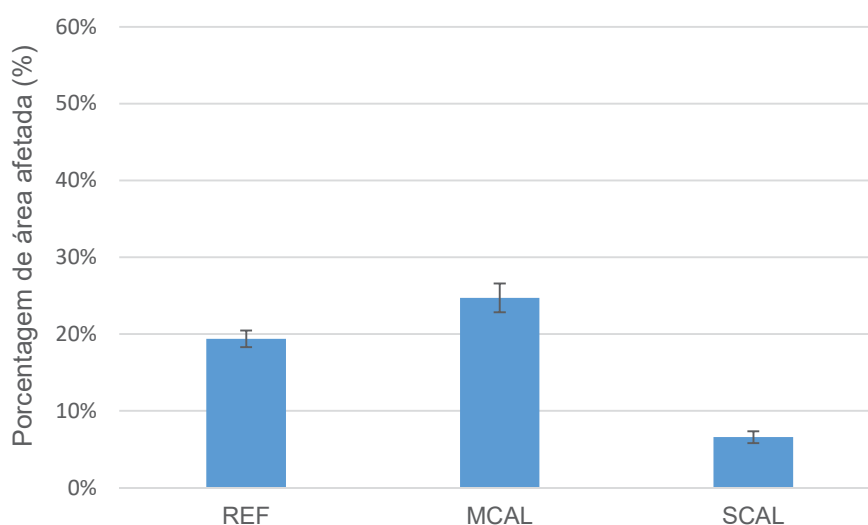


FIGURA 45 – RESULTADOS NA METODOLOGIA COPO

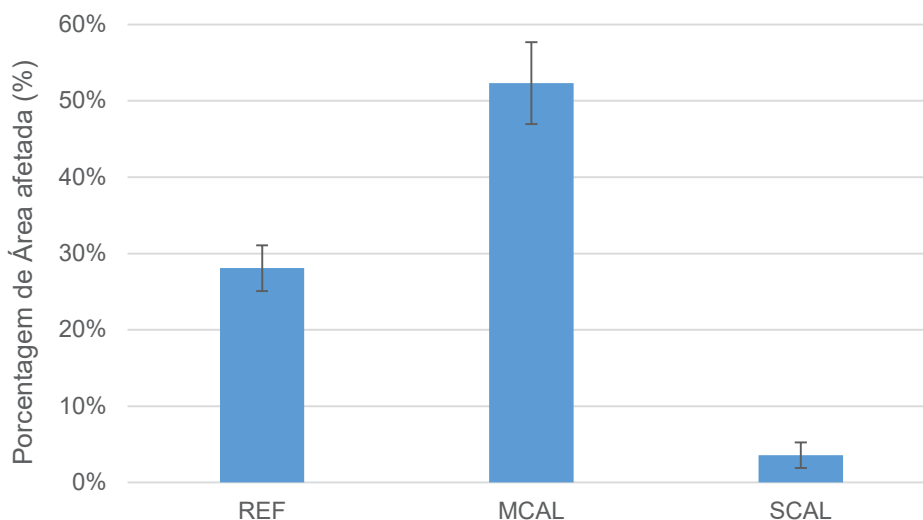
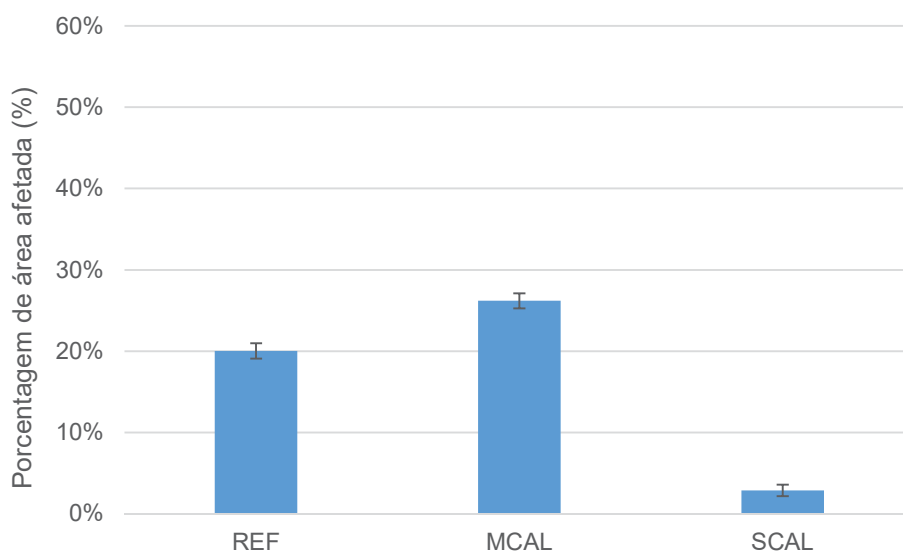


FIGURA 46 – RESULTADOS NA METODOLOGIA POTE



A fim de verificar se as diferenças encontradas entre os traços efetivamente se devem à variação do teor da cal e não somente de uma variação de ensaio, novamente foi utilizado o método ANOVA (Tabelas 21 a 23 da seção “Anexo”), seguido de uma análise múltipla de médias (Tabela 17).

O limite de decisão para a análise múltipla de médias foi calculado conforme sugerido por Ribeiro e Caten (2003) e teve o valor de 5,38% para o método Copo. Para esta análise múltipla de médias será utilizado neste trabalho somente o método COPO por ser o que mais gerou eflorescências. Os demais métodos, por terem gerado

menos eflorescência, poderiam levar a conclusões errôneas com relação à representatividade estatística dos resultados observados.

TABELA 17 – ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – MÉTODO COPO

Par analisado	Diferença das médias	Relevância (Dif > Fcrit)
REF - MCAL	24,23%	SIM
REF - SCAL	24,50%	SIM
MCAL - SCAL	48,73%	SIM
Fcrit= 5,38%		

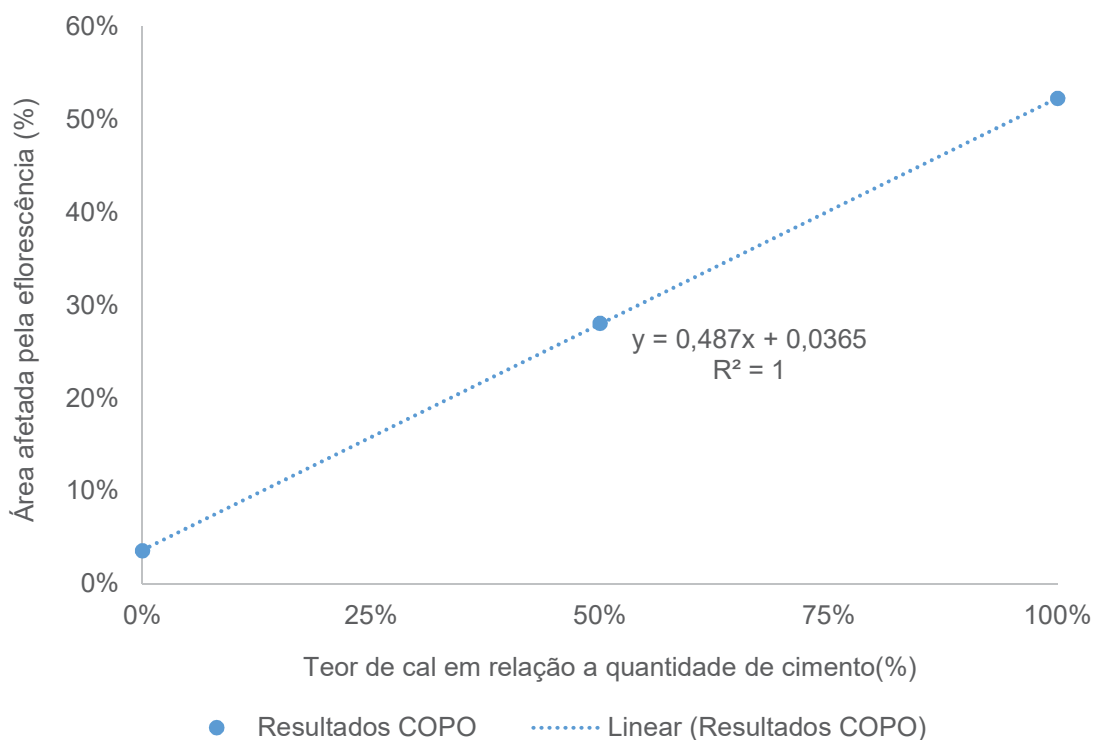
Após o tratamento estatístico dos resultados, pode-se concluir que há uma diferença estatística entre os diferentes teores de cal e que a quantidade de eflorescência se mostrou crescente com o aumento do teor deste aglomerante hidráulico, em relação a quantidade de cimento.

Plotando-se os resultados do teor de cal e da quantidade de eflorescência formada pelo método COPO, conforme apresentado na Figura 47, pode-se notar que há uma relação perfeitamente linear entre os dois parâmetros. Embora até o momento estava-se percebendo que a retirada da cal gerava um maior impacto nas demais propriedades do que seu aumento, como observado na Figura 37, o mesmo não ocorreu com a formação de eflorescência. Isto indica que não há uma relação direta entre a quantidade de eflorescência formada e as demais propriedades estudadas. Entretanto, percebe-se uma forte correlação entre a quantidade de cal e a área afetada pela eflorescência.

O resultado encontrado neste trabalho se mostrou o oposto do observado por Ritchie (1955). Este autor havia notado que o decréscimo da dosagem de cal e o aumento do teor de cimento levaram a um aumento da quantidade de eflorescência formada. Contudo, o autor não realizou ensaios complementares que possibilitassem compreender a razão pela qual este fenômeno ocorreu, visto que o acréscimo de cal leva a um aumento da quantidade de hidróxido de cálcio presente na argamassa, conforme anteriormente calculado e demonstrado na Tabela 15.



FIGURA 47 – RELAÇÃO TEOR DE CAL X EFLORESCÊNCIA – MÉTODO COPO



O resultado encontrado neste trabalho se mostrou o oposto do observado por Ritchie (1955). Este autor havia notado que o decréscimo da dosagem de cal e o aumento do teor de cimento levaram a um aumento da quantidade de eflorescência formada. Contudo, o autor não realizou ensaios complementares que possibilitassem compreender a razão pela qual este fenômeno ocorreu, visto que o acréscimo de cal leva a um aumento da quantidade de hidróxido de cálcio presente na argamassa, conforme anteriormente calculado e demonstrado na Tabela 15.

Além disso, neste presente trabalho, torna-se claro pelos ensaios complementares realizados que o aumento do teor de cal em relação ao teor de cimento leva a um incremento na porosidade e na absorção, fatos que somados ao incremento do teor de hidróxido de cálcio, justificam o aumento da eflorescência observado com o incremento do teor de cal.

#### 6.4.2. Efeito da dosagem de pozolana

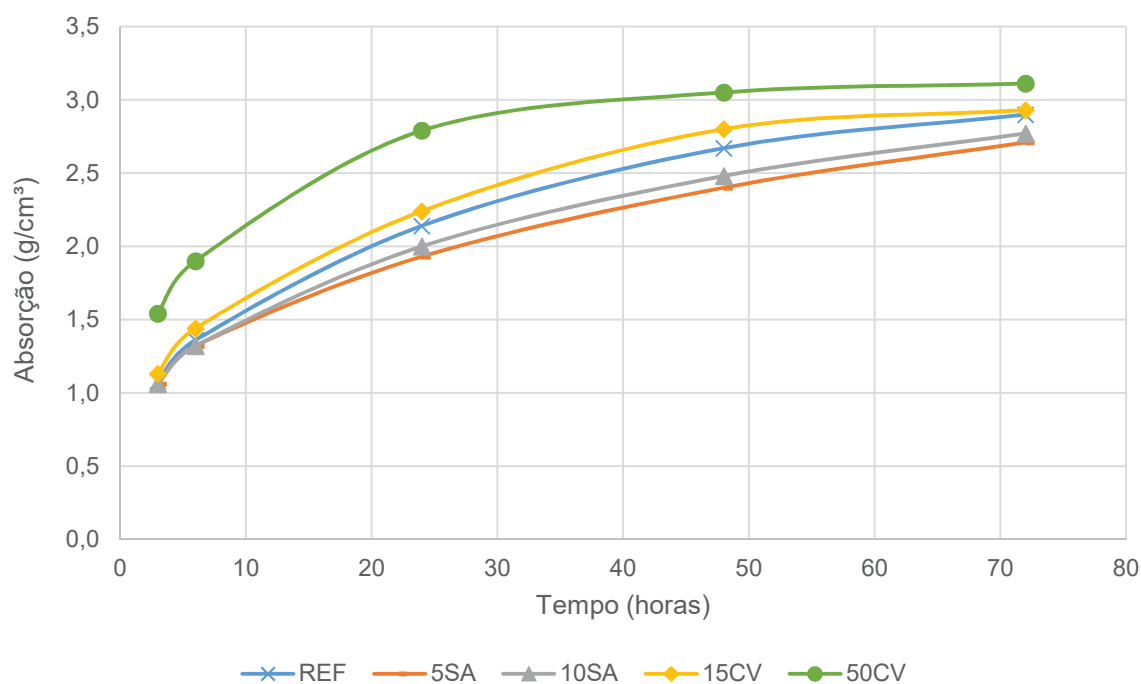
Da mesma maneira que demonstrado para o efeito da cal, primeiramente serão exibidos os resultados dos ensaios complementares e, sequencialmente, os resultados dos ensaios acelerados. Desta maneira, a compreensão dos resultados finais se torna mais lógica.

##### a) Absorção

Pode-se notar na Figura 48 que a utilização de sílica ativa (traços 5SA e 10SA) gerou uma redução na absorção das argamassas, apesar de não haver uma diferença estatística entre os dois teores da adição, conforme demonstrado na Tabela 18. Esta redução também já foi observada por alguns autores como Matte e Moranville (1999) e Valipour *et al.* (2013) e pode ser justificada pelo refinamento dos poros e da densidade da matriz cimentícia devido à formação de novos cristais de C-S-H pela reação pozolânica.

A utilização de 15% de cinza volante não levou a um incremento estatisticamente relevante frente ao traço de referência, conforme Tabela 18. Já o uso de 50% da adição aumentou significativamente a absorção. Este incremento da absorção com a utilização de cinza volante também foi notado por Chousidis *et al.* (2015), Givi *et al.* (2010) e Bicer (2018). Uma justificativa para este fato é que estes ensaios foram realizados com 28 dias e a cinza volante se trata de uma pozolana de baixa reatividade. Além disso, houve uma substituição do cimento por esta adição, gerando uma menor quantidade de cristais formados e tornando a matriz mais porosa e com menor resistência.

FIGURA 48 – RESULTADO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



Para o método de análise múltipla de médias o limite de decisão calculado foi de 0,152g/cm².

TABELA 18 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Par Analisado	Diferença das Médias	Relevância (Dif>Fcrit)
REF – 5SA	0,218	SIM
REF – 10SA	0,203	SIM
REF – 15CV	0,037	NÃO
REF – 50CV	0,180	SIM
5SA – 10SA	0,020	NÃO
5SA - 15CV	0,181	SIM
5SA - 50CV	0,398	SIM
10SA - 15CV	0,166	SIM
10SA - 50CV	0,383	SIM
15CV - 50CV	0,217	SIM

### b) Resistência a tração na flexão e à compressão

Nas Figuras 49 e 50 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, respectivamente.

Como pode ser visto, tanto a resistência à tração na flexão, quanto à resistência à compressão aos 28 dias aumentaram com a utilização de sílica ativa e reduziram com a utilização de cinza volante. Isso ocorreu devido ao fato de a sílica ativa ser uma pozolana de alta reatividade, enquanto a cinza volante é de baixa. Entretanto, em idades mais avançadas, principalmente a partir de 56 dias, as resistências dos traços com cinza volante se igualariam, ou mesmo superariam, o traço de referência. Estes mesmos fenômenos já foram observados por outros autores (POONS *et al.*, 1999; GLEIZE *et al.*, 2003; BICER, 2018).

FIGURA 49 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

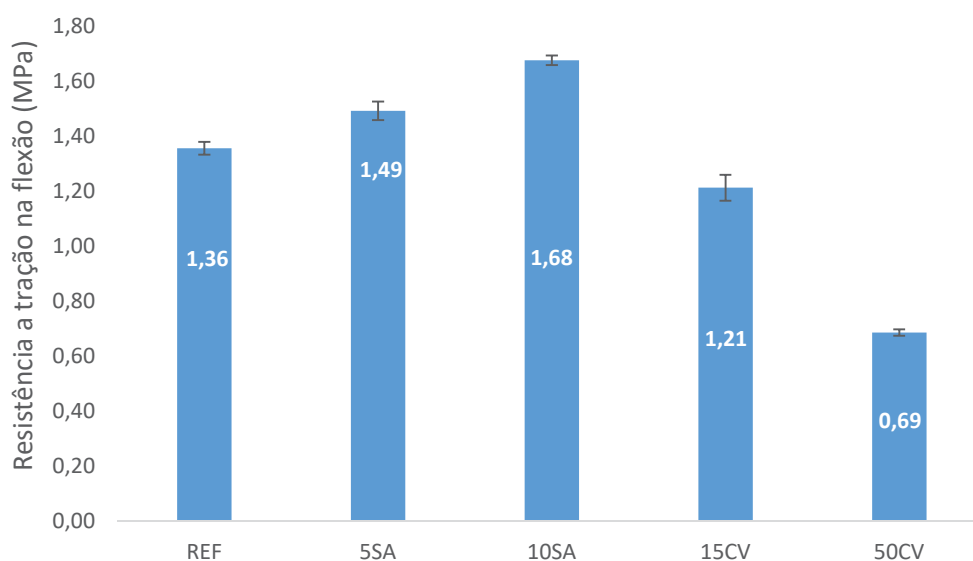
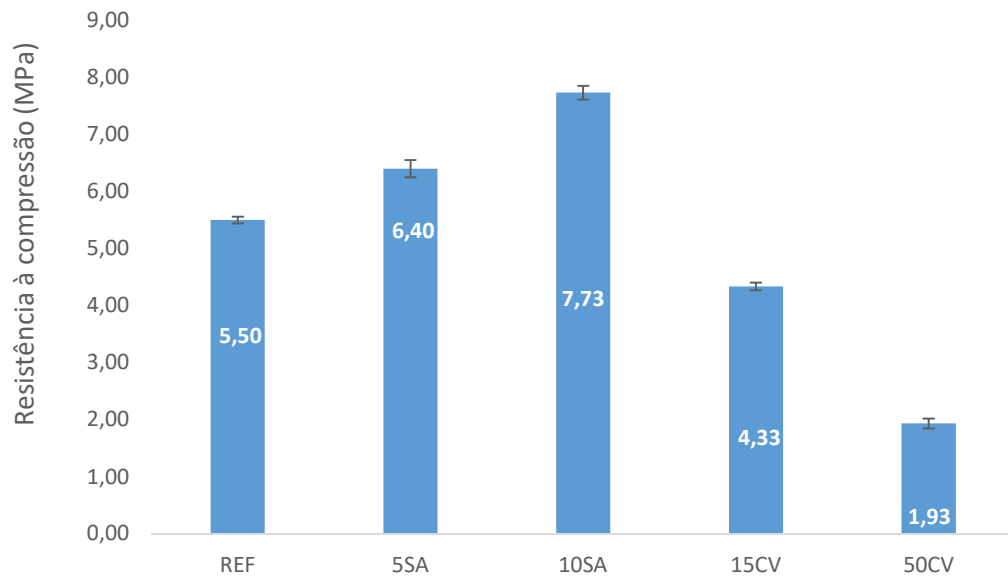


FIGURA 50 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

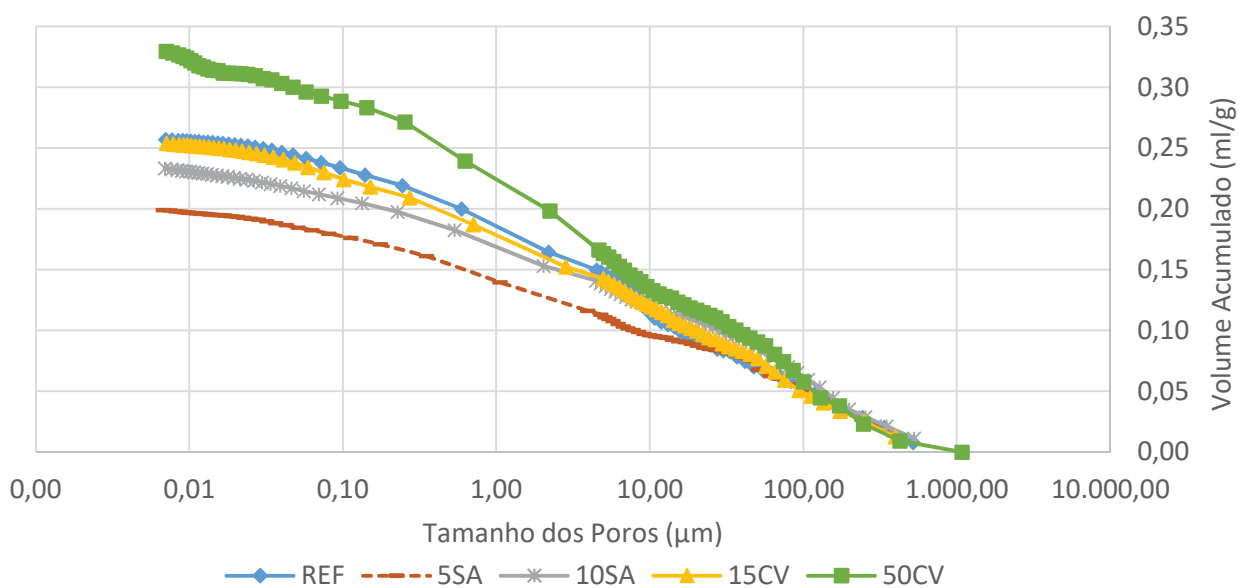


### c) Porosimetria de Mercúrio

Conforme pode-se observar na Figura 51, a utilização de 15% de cinza volante (15CV) não gerou diferenças significativas de porosidade frente ao traço de referência (REF). Entretanto, a utilização de 50% desta polozana (50CV) aumentou substancialmente a porosidade. Poon, Lam e Wong (1999) e Wang *et al.* (2004) também notaram este aumento da porosidade com a utilização de cinza volante.

Já com relação à utilização de sílica ativa, observa-se que seu uso gerou uma redução na porosidade total das argamassas. Esta redução de porosidade total com a utilização de sílica ativa também foi notada por Gleize *et al.* (2003) e Pons *et al.* (2006).

FIGURA 51 – POROSIMETRIA DE MERCÚRIO – PASTILHAS ANTES DO ENSAIO ACELERADO



#### d) Ensaio Acelerado

Após 7 dias de cura e 28 dias de ensaios acelerados, pode-se notar que a dosagem de sílica ativa reduziu a quantidade de eflorescência formada, sendo esta redução maior com o incremento do teor desta adição. Entretanto, a utilização de cinza volante apresentou um resultado oposto, gerando um incremento da quantidade de eflorescência formada, principalmente com a dosagem de 50%. Este fenômeno pode ser visualizado nas Figuras 52 a 54.



FIGURA 52 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA AR+CALOR – EFEITO DAS POZOLANAS

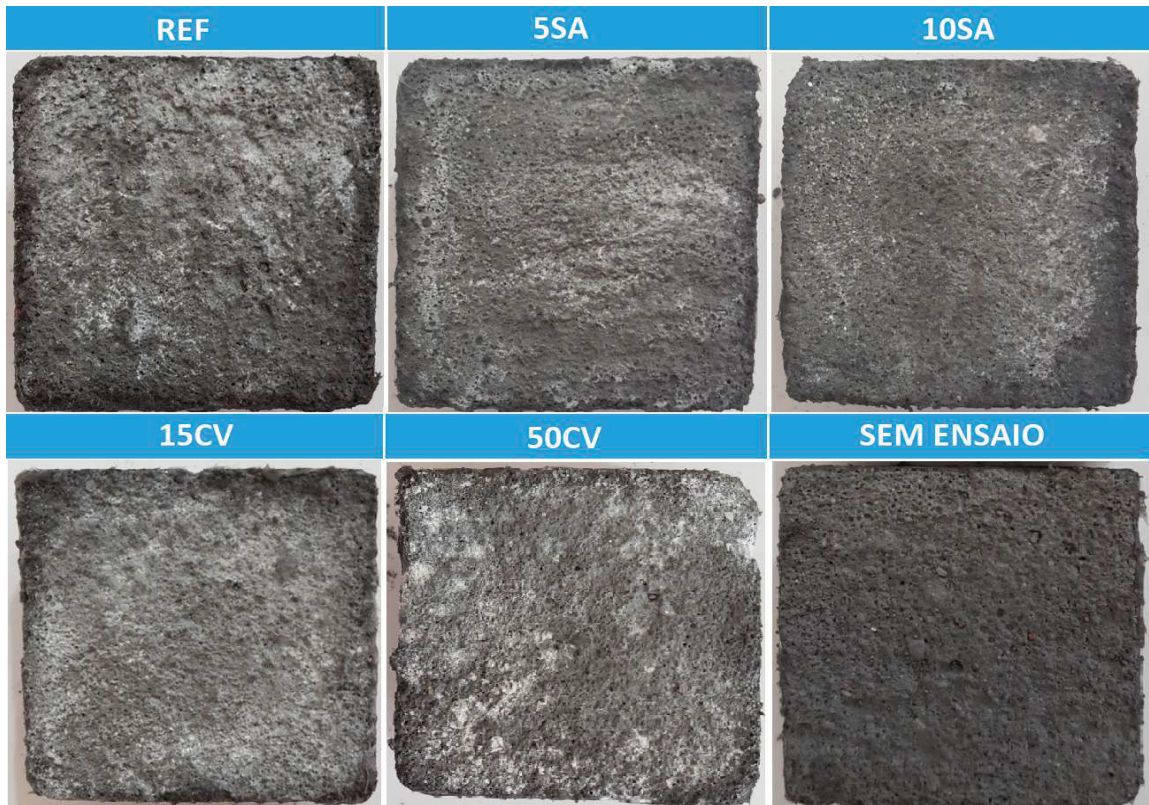


FIGURA 53 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA COPO – EFEITO DAS POZOLANAS

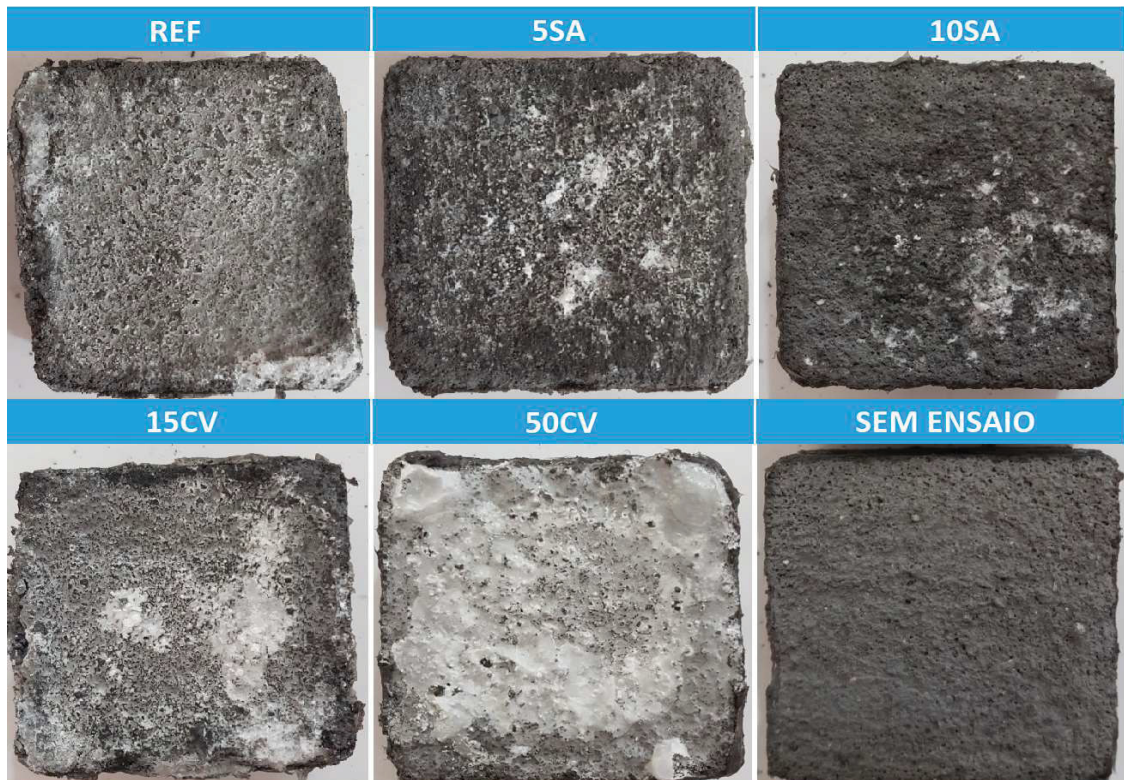
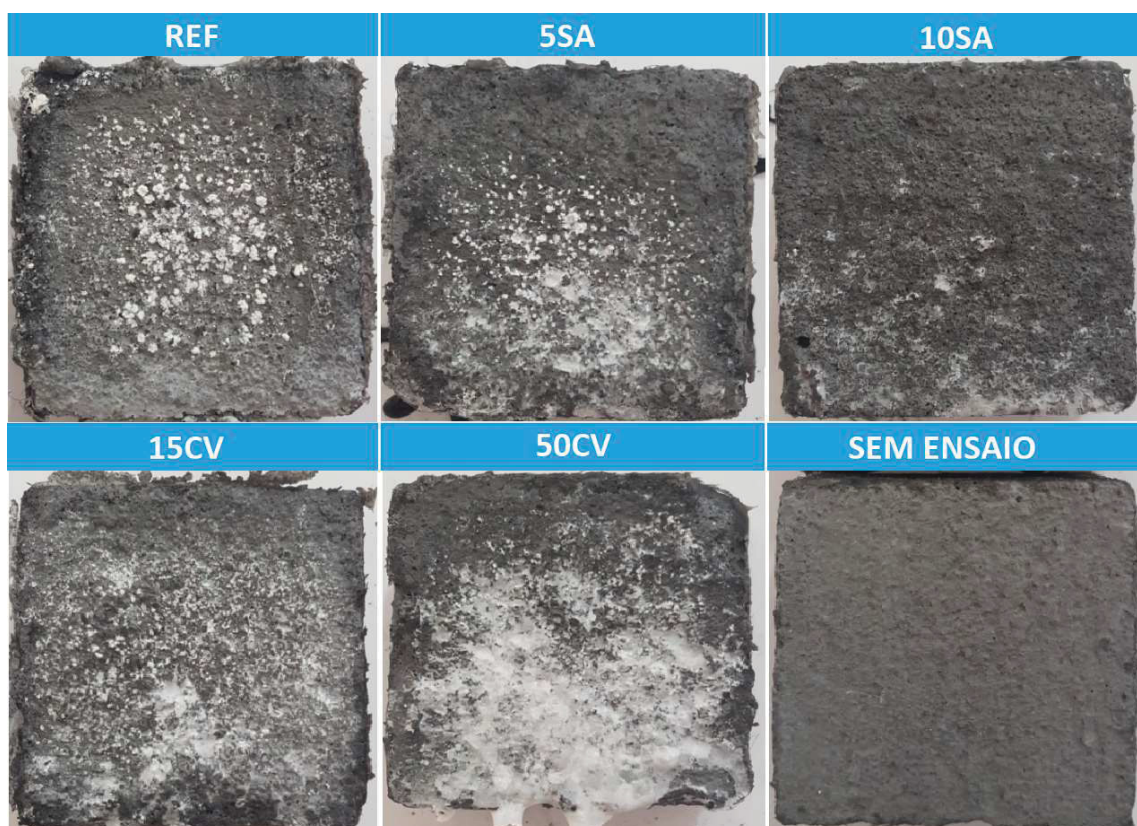




FIGURA 54 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NA METODOLOGIA POTE – EFEITO DAS POZOLANAS



Conforme ocorreu com a adição da cal, as diferenças entre os traços se tornam mais visíveis nas metodologias COPO e POTE, visto que são as que geram maiores quantidades de eflorescência.

Da mesma forma que realizado anteriormente, após os ensaios, as fotografias de cada uma das pastilhas foram tratadas no software MATLAB. Os valores encontrados de porcentagem da área afetada pela eflorescência em cada uma das pastilhas estão apresentados nas Figuras 55 a 57. Nota-se que, embora em intensidades diferentes, a tendência de comportamento a respeito da adição de pozolanas foi a mesma, independentemente da metodologia de ensaio acelerado adotada (A+C; COPO ou POTE).

FIGURA 55 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA A+C – EFEITO DAS POZOLANAS

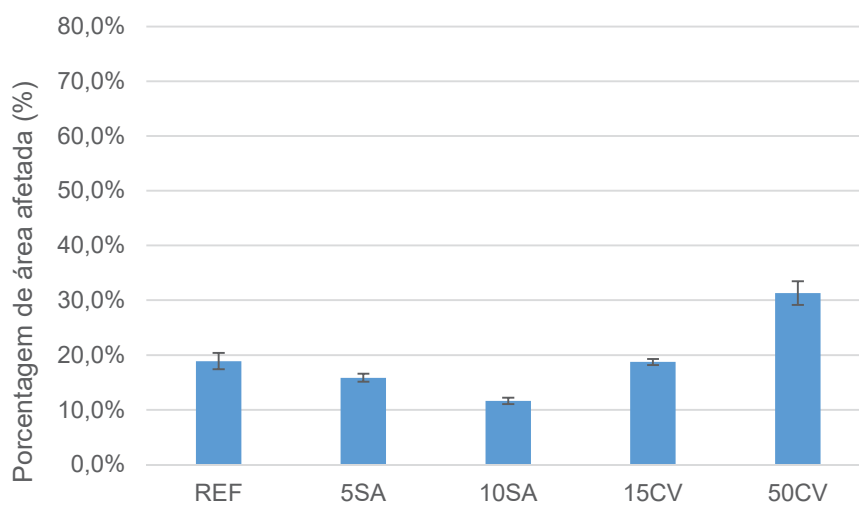


FIGURA 56 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA COPO – EFEITO DAS POZOLANAS

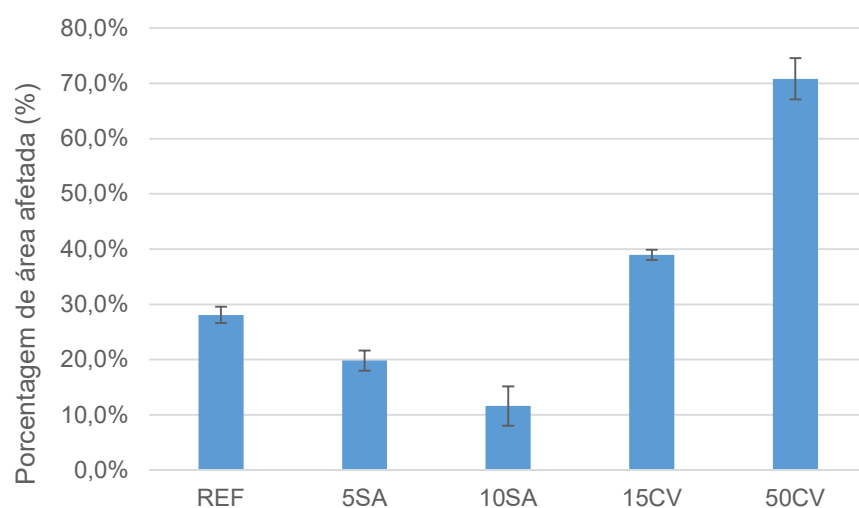
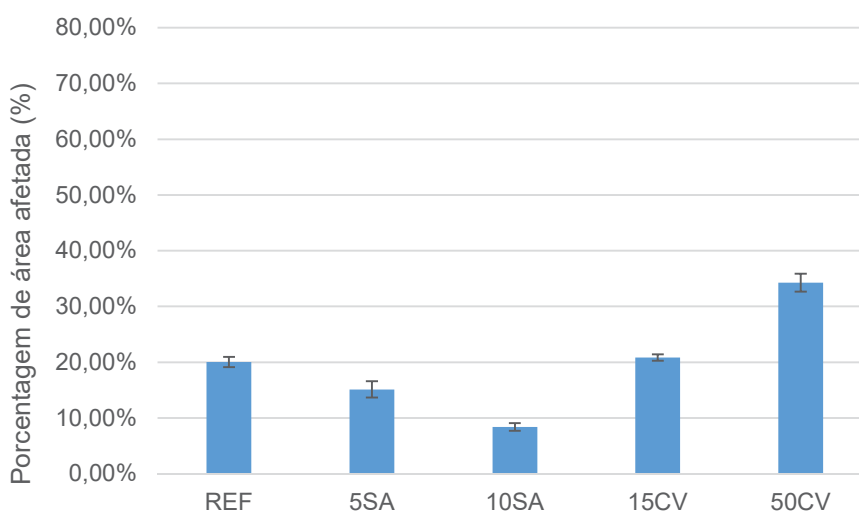


FIGURA 57 – EFLORESCÊNCIAS NA METODOLOGIA POTE – EFEITO DAS POZOLANAS



A fim de verificar se as diferenças encontradas entre os traços efetivamente se devem a variação do teor de pozolana e não somente de uma variação de ensaio, novamente foi utilizado o método ANOVA (Tabelas 24 a 27 da seção “Anexo”), seguido de uma análise múltipla de médias (Tabelas 19).

O limite de decisão para a análise múltipla de médias foi calculado conforme sugerido por Ribeiro e Caten (2003) e teve o valor de 7,4% para o método. Ou seja, qualquer diferença de média maior do que este limite significa que há uma diferença estatística entre os dois métodos. Após o tratamento estatístico dos dados, pode-se notar que existe efetivamente uma diferença estatística entre os diferentes traços praticados.

TABELA 19 – ANALISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS – MÉTODO COPO

FATOR 1	FATOR 2	MÉDIA FATOR 1	MÉDIA FATOR 2	DIFERENÇA	RELEVANTE
REF	5SA	0,280947	0,198476	8,25%	SIM
REF	10SA	0,280947	0,11599	16,50%	SIM
REF	15CV	0,280947	0,389641	10,87%	SIM
REF	50CV	0,280947	0,78655	50,56%	SIM
5SA	10SA	0,198476	0,11599	8,25%	SIM
5SA	15CV	0,198476	0,389641	19,12%	SIM
5SA	50CV	0,198476	0,78655	58,81%	SIM
10SA	15CV	0,11599	0,389641	27,37%	SIM
10SA	50CV	0,11599	0,78655	67,06%	SIM
15CV	50CV	0,389641	0,78655	39,69%	SIM

Analisando-se estes resultados, observa-se que a utilização de sílica ativa reduziu a quantidade de eflorescência gerada, sendo esta redução maior com 10% de substituição do cimento. Este resultado se mostrou em conformidade com o observado por Weng *et al.* (2013) e Delair (2007), os quais notaram que a utilização de uma pozolana de alta reatividade (metacaulim no caso destes trabalhos) reduziu a quantidade de eflorescência formada em seus estudos. Este fenômeno pode ser justificado pela redução da quantidade de hidróxido de cálcio nestas argamassas, devido a reação pozolânica da sílica ativa (SAITO e DEGUSHI, 2000; MEDEIROS *et al.*, 2017b), além das reduções de absorção e porosidade já demonstradas nas Figuras 48 a 51.

Por outro lado, a utilização de cinza volante apresentou um resultado inverso, gerando um incremento na quantidade de eflorescência, sendo esta maior com 50% de substituição. Apesar de a cinza volante ter potencial de consumir hidróxido de cálcio, como demonstrado por Dojkov *et al.* (2013) e Medeiros *et al.* (2017a), esta reação é lenta, conforme previamente notado por diversos autores (WENG *et al.*, 1997; LAM *et al.*, 2000; BAERT *et al.*, 2008; DESCHNER *et al.*, 2012). Além disso, a maior quantidade de eflorescência formada pode ser explicada ainda pela maior porosidade e absorção destas argamassas, conforme demonstrado nas figuras 48 a 51.

Como pode-se perceber nos cálculos teórico de portlandita de cada traço, demonstrados na Figura 35, o 50CV é o traço que possui uma menor quantidade de portlandita final. Contudo, esse cálculo considera que as pozolanas tiveram tempo suficiente para que boa parte de sua reação tenha ocorrido e, segundo Sakai *et al.* (2005), é somente a partir dos 28 dias que a reação pozolanica da cinza volante de fato se intensifica. Portanto, possivelmente o período de 7 dias de cura tenha sido insuficiente para ocorrer uma avançada reação pozolanica da cinza volante, a qual permitiria uma densificação da matriz e uma redução da quantidade de hidróxido de cálcio na argamassa.

#### 6.4.3. Impacto da duração do ensaio acelerado

Visando avaliar se o período de ensaio de 28 dias, após o período de cura de 7 dias, foi apropriado para desenvolvimento da eflorescência ou se haveria necessidade de se realizar o ensaio por um período mais prolongado de tempo, realizou-se a raspagem da eflorescência formada após estes 28 dias e retornou-se as peças ao ensaio acelerado por mais 28 dias, na situação COPO.

Conforme pode-se observar na Figura 58, não houve nova formação de eflorescência após a raspagem, exceto para os traços 50CV e MCAL, os quais apresentavam uma grande porosidade inicial. Nos demais traços não ocorreram incrementos na eflorescência devido a uma colmatação dos poros, reduzindo a permeabilidade de água. Este fato ficou claro analisando-se a Figura 59, onde

percebe-se que a superfície da pastilha se encontra visivelmente seca durante o ensaio (após 28 dias), indicando não estar havendo passagem de água para uma então evaporação nesta superfície e formação de eflorescência.

FIGURA 58 – PASTILHA APÓS RASPAGEM E MAIS 28 DIAS DE ENSAIO

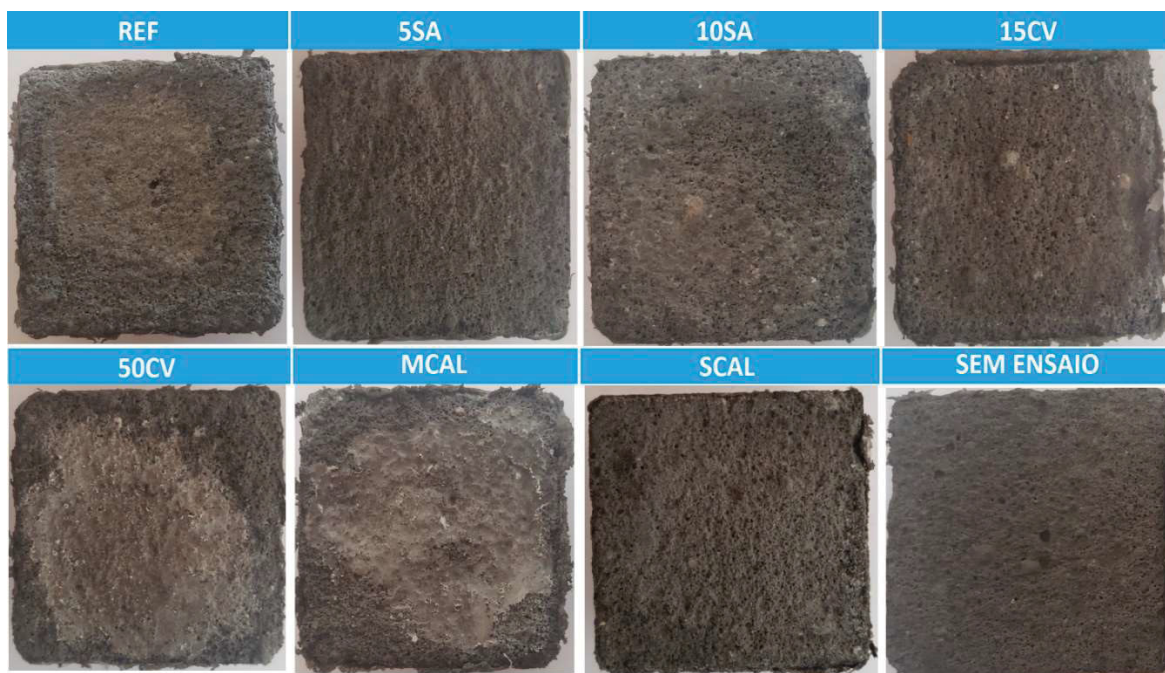


FIGURA 59 – PASTILHA DA AMOSTRA DE REF PRATICAMENTE SECA DURANTE O ENSAIO PROLONGADO (AOS 40 DIAS)





#### 6.4.4. Impacto do grau de hidratação para início do ensaio

Tendo em vista a utilização de adições pozolânicas no estudo, principalmente da cinza volante, cuja característica é de uma adição de baixa reatividade em idades iniciais, testou-se ainda o impacto de se utilizar mais 2 idades de hidratação diferentes (28 e 91 dias), antes da execução do ensaio acelerado.

Analizando-se os resultados apresentados nas Figuras 60 e 61 para idade de 7 e 28 dias, observa-se que não houve uma interferência significativa deste tempo de hidratação na incidência de eflorescências. Os traços com adição pozolânica (cinza volante – 15CV e 50CV; sílica ativa – 5SA e 10SA) apresentaram resultados iguais para ambos as idades.

Entretanto, comparando-se os resultados apresentados referentes ao período de cura de 7 e 91 dias, observa-se que houve uma redução significativa da eflorescência em todas os traços. Isso possivelmente ocorreu devido a uma melhor hidratação dos aglomerantes utilizados, incluindo a carbonatação da cal dentro da pastilha. Durante os ensaios, foi possível notar uma redução da permeabilidade de água das pastilhas com 91 dias frente aos ensaios realizados com as amostras de 7 e 28 dias.

Outra observação importante que pode ser realizada é que aos 91 dias os traços com sílica ativa permitiram a formação de uma quantidade pequena de eflorescência, mesmo com dosagem de 10%. Entretanto, os traços com cinza volante, principalmente o 50CV, gerou uma quantidade muito baixa de eflorescência, similar ao traço SCAL, sem utilização de cal. Esta observação corrobora as quantidades de hidróxido de cálcio demonstradas na Figura 35 e as observações feitas por diversos autores sobre a morosidade da reação pozolânica da cinza volante, tanto para redução da porosidade e absorção (GLEIZE *et al.*, 2003; PONS *et al.*, 2006; GIVI *et al.* 2010; KHAN E ALHOZAIMY, 2011; VALIPOUR *et al.*, 2013; CHOUSIDIS *et al.*, 2015), quanto para o efetivo consumo do hidróxido de cálcio (WENG, LANGEN e WARD, 1997; LAM *et al.*, 2000; ; BAERT *et al.*, 2008; DESCHNER *et al.*, 2012).

FIGURA 60 – EFLORESCÊNCIAS FORMADAS NO ENSAIO ACELERADO EM DIFERENTES GRAUS DE HIDRATAÇÃO

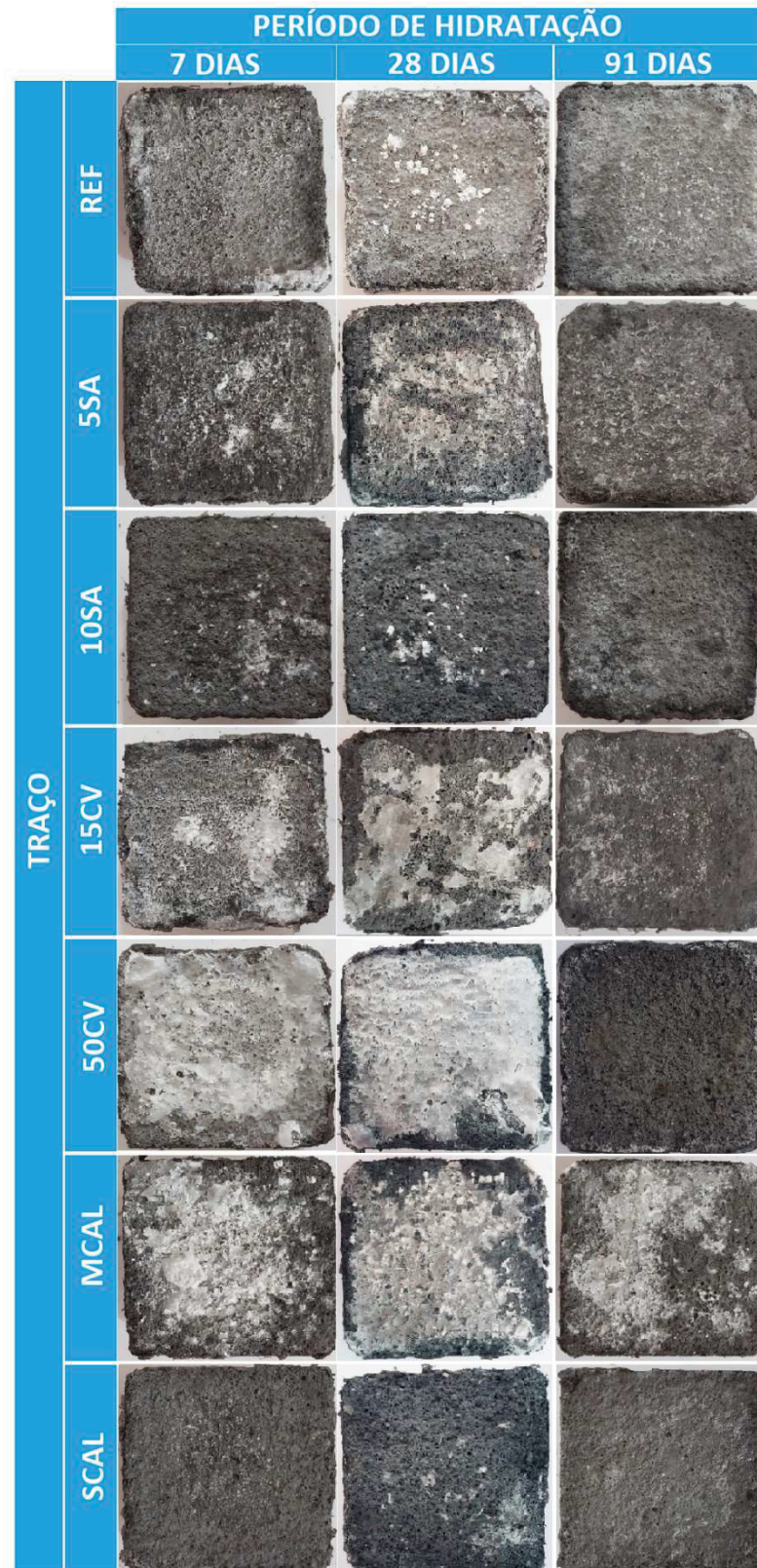
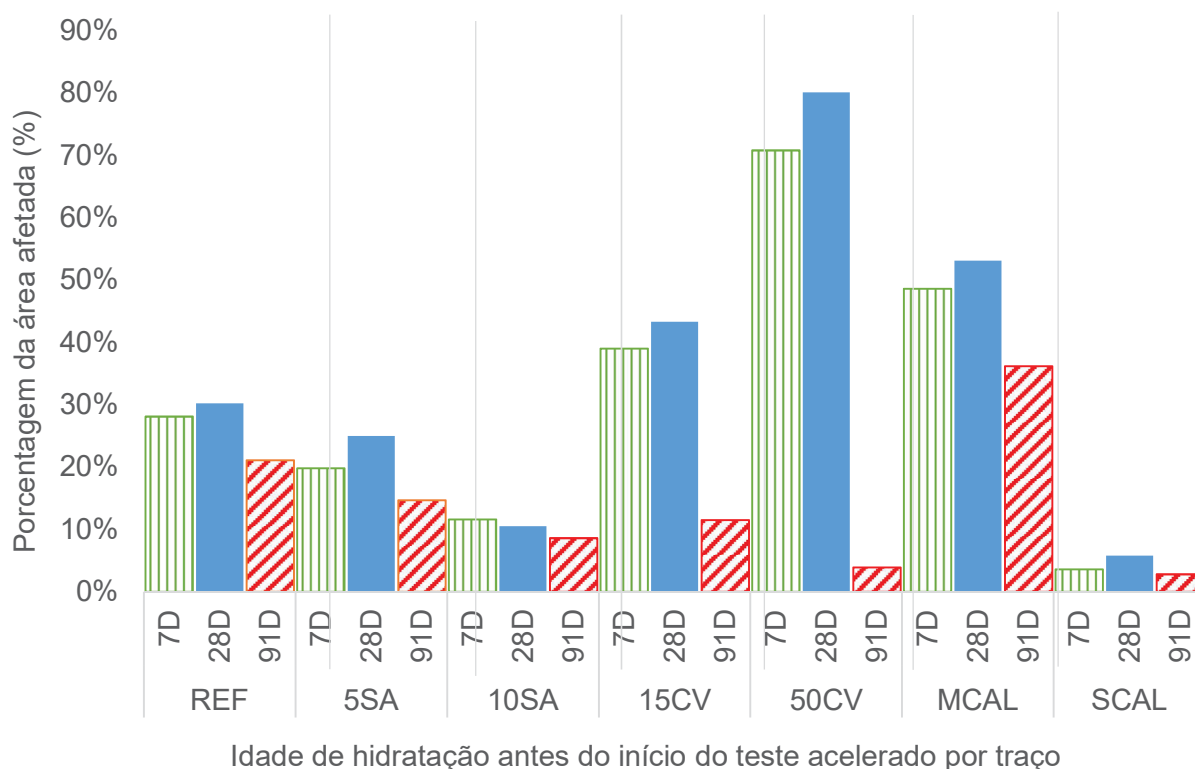




FIGURA 61 – ÁREAS AFETADAS POR EFLORESCÊNCIA COM DIFERENTES PERÍODOS DE HIDRATAÇÃO ANTES DO ENSAIO ACELERADO



Traçando-se correlações entre o teor de cada uma das pozolanas e a quantidade de eflorescência formada, pode-se perceber que, se iniciando o ensaio acelerado com 7 dias de idade, há uma redução linear da quantidade de eflorescência com incremento do teor de sílica ativa. Entretanto, o mesmo não ocorreu para a cinza volante pelas razões já comentadas anteriormente. Contudo, traçando-se estas mesmas correlações para os resultados dos testes realizados com as pastilhas com período de hidratação de 91 dias, nota-se que ambas as adições geram reduções lineares da quantidade de eflorescência formada. Esta relação linear ocorre visto que a redução da quantidade de hidróxido de cálcio pelo das adições, demonstradas previamente na Figura 35, também segue uma tendência linear. Estas correlações do teor de adição e quantidade de eflorescência estão apresentadas nas Figuras 62 e 63.

FIGURA 62 – CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE SÍLICA ATIVA E A QUANTIDADE DE EFLORESCÊNCIA FORMADA PARA CPS COM 7 E 91 DIAS DE HIDRATAÇÃO

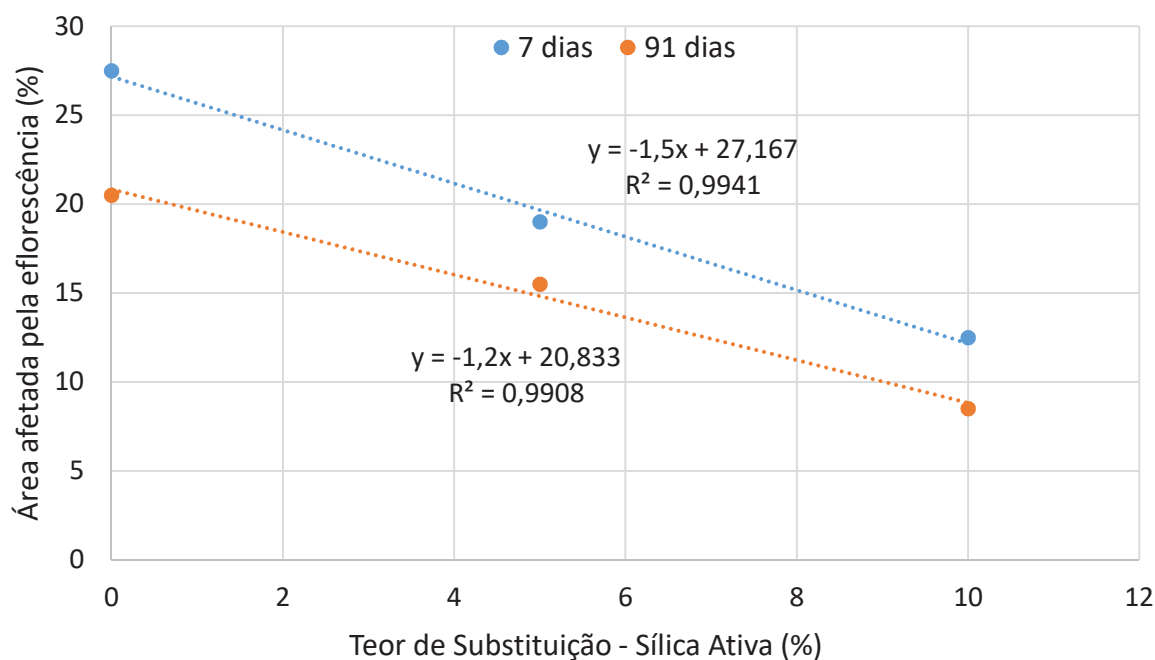
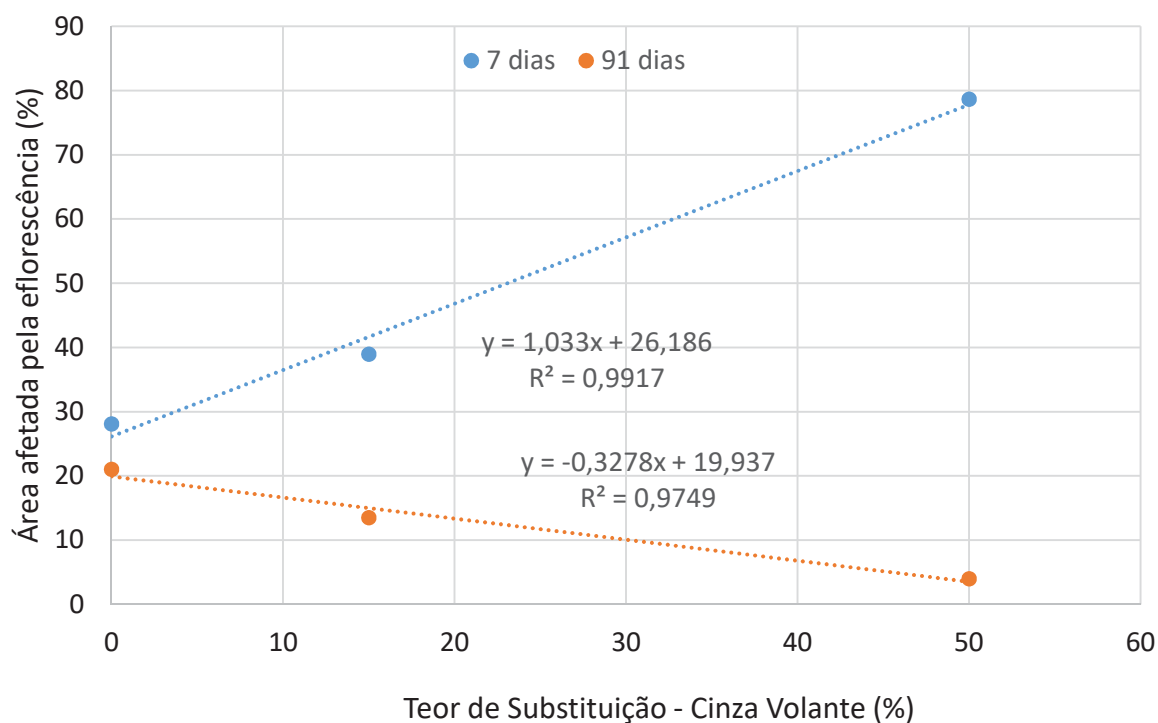


FIGURA 63 – CORRELAÇÃO ENTRE TEOR DE CINZA VOLANTE E A QUANTIDADE DE EFLORESCÊNCIA FORMADA PARA CPS COM 7 E 91 DIAS DE HIDRATAÇÃO



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos experimentos realizados neste trabalho, pode-se realizar as seguintes observações:

- Dentre as oito condições de ensaio acelerado estudadas, as condições “POTE” e “COPO” foram as que geraram a maior quantidade de eflorescência, seguida pela condição “AR+CALOR”. Isso ocorreu devido a estas primeiras condições permitirem a introdução de uma pressão de água, gerando uma permeabilidade forçada e uma maior lixiviação. A situação “AR+CALOR” se sobressaiu das demais 5 condições devido a existência de um período sem calor, no qual a ascensão de água ocorria e um período com presença de calor, o qual gerava uma maior evaporação.
- De todas as oito condições de ensaio acelerado, a situação COPO se mostrou a mais adequada para utilização, inclusive frente a situação POTE, devido a direção da pastilha. Na condição COPO a pastilha é mantida horizontal, fato que cria uma distribuição praticamente uniforme da eflorescência. Já na condição POTE as pastilhas são posicionadas verticalmente, fazendo com que haja uma predominância de eflorescência na parte inferior da pastilha, devido a ação da gravidade, o que pode levar a uma dificuldade de quantificação desta eflorescência e, inclusive, a conclusões errôneas.
- A técnica de análise gráfica utilizando o software MATLAB se mostrou adequada para auxiliar na quantificação dos resultados e deixá-los menos subjetivos.
- Como esperado e determinado através dos ensaios de TGA e DRX, o material predominante da eflorescência formada pelo ensaio acelerado foi o carbonato de cálcio.
- O incremento da dosagem de cal na argamassa aumentou a porosidade e absorção destas, além de reduzir a resistência à tração na flexão e à compressão. Este fato, atrelado a uma maior disponibilidade de

hidróxido de cálcio para ser lixiviado, levou a um incremento na quantidade de eflorescência formada.

- A introdução da cal no traço gera um maior impacto nas propriedades da argamassa, como absorção, porosidade e resistências mecânicas, do que seu aumento, uma vez já estando utilizando este aglomerante no traço;
- Do ponto de vista de formação de eflorescência, pode-se dizer que para uma argamassa com faixa de absorção entre 2,3 a 3,2g/cm<sup>3</sup>, o incremento de cal gera um aumento proporcional na quantidade de eflorescência formada;
- Iniciando o ensaio acelerado com 7 dias de período de hidratação, observou-se também que a utilização de 15% cinza volante apresentou pouca alteração em termos de absorção, porosidade e quantidade de eflorescência formada frente ao traço de referência. Já a utilização de 50% de cinza volante gerou incrementos substanciais em todos estes parâmetros. Entretanto, iniciando-se o ensaio com 91 dias de hidratação, nota-se que os traços tanto com 15%, como com 50% de substituição de cimento por cinza volante, apresentaram grandes reduções na quantidade de eflorescência formada, gerando, inclusive, menores eflorescências do que o traço de referência. Esta redução foi mais predominante para o traço 50% da adição (50CV).
- A utilização de sílica ativa gerou redução na quantidade de eflorescência formada com qualquer idade de hidratação, apesar de esta redução também ser maior com 91 dias. A utilização de uma dosagem 10% reduziu mais a quantidade de eflorescência do que a dosagem de 5%.
- Comparativamente, a utilização de sílica ativa, em qualquer dosagem, gerou uma maior redução da quantidade de eflorescência do que o uso da cinza volante, iniciando-se o ensaio o ensaio acelerado com 7 ou 28 dias de hidratação. Contudo, iniciando-se o ensaio com 91 dias de hidratação, a utilização de 50% de cinza volante se sobressaiu aos demais, praticamente suprimindo qualquer formação de eflorescência, devido a uma menor disponibilidade final de portlandita, conforme teoricamente calculado e demonstrado na Figura 35.

- Observou-se não haver necessidade de se prolongar a duração do ensaio acelerado por mais do que 28 dias, visto que a formação das eflorescências ocorreu, majoritariamente, nos primeiros 14 dias de ensaio.
- Os ensaios acelerados sugeridos nesta dissertação têm como principal finalidade indicar um potencial de eflorescência, principalmente para usos comparativos entre diferentes materiais ou dosagens. Estes ensaios não necessariamente indicam quanto de fato de eflorescência ocorrerá na prática, visto que em uma situação real outras variáveis também são relevantes, como por exemplo: presença de vento, espessura da argamassa, variação térmica, forma de percolação de água (somente molhagem pela chuva ou percolação por uma infiltração entre argamassa e substrato), etc. Além disso, como na prática o processo de formação da eflorescência costuma ser poroso, há possibilidade de que ocorra colmatação de parte dos poros da argamassa, reduzindo também a formação de eflorescência.

## SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Parametrizar o ensaio acelerado, analisando qual a melhor idade para início do teste para diferentes tipos de cimento, qual a duração mínima do ensaio, qual a melhor temperatura e qual a pressão de água ideal;
- Comparar o aparecimento de eflorescências em uma parede real exposta ao ambiente com o ensaio acelerado, a fim de conseguir determinar a taxa de aceleração do ensaio;
- Analisar o impacto de diferentes tipos de cal (dolomítica x calcítica; CHI vs CHII) na incidência de eflorescências;
- Analisar o impacto de diferentes tipos de agregado miúdo e granulometrias sobre o aparecimento desta manifestação patológica;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, F.; LAFHAJ, Z.; SKOCZYLAS, F.; LOODSVELDT, H.; Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar, **Cement and Concrete Research**, n.37, pp 71-78, 2007.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K., Cement Substitution by a combination of metakaolin and limestone, **Cement and Concrete Research**, Vol. 42, pp. 1579-1589, 2012.

ABERLE, T.; KELLER, A.; ZURBRIGGEN, R. Efflorescence. Mechanisms of formation and ways to prevent. **2º Congresso Nacional de Argamassas para Construção - APFAC**, Lisboa, 2007.

APHANE, M., E., **The hydration of magnesium oxide with diferente reactivities by water and magnesium acetate**, Dissertação de mestrado, Universidade da África do Sul, Cidade do Cabo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 7221**. Agregado — Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas — Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**. Cal Hidratada para argamassas – Requisitos . Rio de Janeiro. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro. 2012

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro. 2014

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.



\_\_\_\_\_. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005..

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13749**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Especificação. Rio de Janeiro. 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.575** – Partes 1 a 6: Desempenho de edifícios habitacionais, Rio de Janeiro, 2013

\_\_\_\_\_. **NBR 15985**. Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro. 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

ASTM INTERNACIONAL, **ASTM D4404**. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, Philadelphia, 2010.

ASTM INTERNACIONAL. **ASTM C-67-92a**. Standard test methods of sampling and testing brick and structural clay tile. Philadelphia, 1992.

AUDENAERT, K., **Transportmechanismen in zelfverdichtend beton in relatie met carbonatie en chloridepenetratie**, Tese de doutorado, Gent Univeridade, 2006.

ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J.I., Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars, **Cement and Concrete Research**, vol. 37, pp. 767-775, 2007.

ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J.I., Blended pastes of cement and lime: Pore Structure and capillary porosity, **Applied Surface Science**, vol. 252, pp. 8077-8085, 2006.

BAERT, G.; HOSTE, S.; SCHUTTER, G.; BELIE, N., Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, vol. 94, pp. 485-492, 2008.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção: novos materiais para construção civil**. 4ª ed. v1. LTC, 2009

BARROSO, T.R., **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas**, dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.

BASTOS, P.; NAKAKURA, E.H.; CINCOTTO, M.A.; Comparação da retração de argamassas industrializadas e mistas de revestimento nos estados fresco e endurecido, **IV Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas**, Florianópolis, 2005.

BARRET, P.; GLASSER, F.P.; Chemistry of Cements for Nuclear Applications, **Elsevier, Symposia Proceedings**, vol. 27, Strasbourg, França, 1992.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E.; POLDER, R.B., **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**, 2a. Edição, Wiley-VCH, Alemanha, 2013.

BEZERRA, A.P *et al.* Ensaio de Eflorescência baseado na norma da ASTM C67-92a. **VII CONNEPI**. Maceió, 2012.

BIANCHIN, A.C., **Influência do proporcionamento dos materiais constituintes no desempenho de argamassas para reboco de recuperação de alvenarias contaminadas por umidade e sais**, Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 1999.

BICER, A., Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly-ash-cement composites. **Thermal Science and Engineering progress**, vol. 8, pp. 78-82, 2018.

BROCKEN, H.; NIJILAND, T. White efflorescence on brick masonry: towards prediction of efflorescence risk. **13<sup>th</sup> IBMAC**. Amsterdam, 2004

CANDIA, M.C.; FRANCO, L.S, **Contribuição ao Estudo das Técnicas de Preparo da Base no Desempenho dos Revestimentos de Argamassa**, Boletim Técnico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAPRARO, A.P.B., **Mudanças nas propriedades microestruturais e mecânicas de pastas e argamassas dosadas com diferentes teores de contaminação por sulfetos**. Dissertação de mestrado. UFPR, Curitiba, 2016.

CARDE, C; FRANÇOIS, R; Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes. **Cement & Concrete Composites**, vol. 21, pp. 181-188, 1999.

CARDE, C; FRANÇOIS, R., Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties, **Cement and Concrete Research**, vol. 27(4), pp. 539-550, 1997.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas** – Editora Pini, 1997.

CERNY, R.; ROVNANIKOVA, P.; **Transport Process in Concrete**, 1a Edição, CRC Press, 2002.

CHENG, A.; CHAO, S.; LIN, W., Effects of Leaching Behavior of Calcium Ions on Compression and Durability of Cement-Based Materials with Mineral Admixtures, **Materials**, vol. 6, pp. 1851-1872, 2013.

CHOI, Y.S.; YANG, E.I., Effect of calcium leaching on the pore structure, strength, and chloride penetration resistance in concrete specimens, **Nuclear Engineering and Design**, vol. 259, pp. 126-136, 2013.

CHOUSIDIS, N.; RAKANTA, E.; IOANNOU, I.; BATIS, G., Mechanical Properties and Durability performance of reinforced concrete containing fly ash, **Construction and Building Materials** vol. 101, pp. 810-817 , 2015.

CHWAST, J.; TODOROVIC, J.; JANSSEN, H.; ELSEN, J.. Gypsum efflorescence on clay brick masonry: field survey and literature study. **Construction and Building Materials**, vol 85, pp. 57-64, 2015.

CULTRONE, G.; SEBASTIAN, E. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials. **Environment Geology**. Espanha, 2008

DELAIR, S.; GUYONNET, R.; GOVIN, A.; GUILHOT, B., Study of efflorescence forming process on cementitious materials. **5<sup>th</sup> International conference on concrete under severe conditions of environmental loading**, França, 2007.

DESCHNER, F.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B.; SEUFERT, S.; SCHWESIG, P.; DITTICH, S.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J.; Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash, **Cement and Concrete Research**, vol. 42, pp. 1389-1400, 2012.

DHIR, R.K.; HEWLETT, P.C.; CHAN, Y.N., Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability, **Magazine of Concrete Research**, vol. 41, pp. 87-97, 1989.

DODSON, V.H., **Concrete Admixture**, Editora Van Nostrand Reinhold, Nova Iorque, 1990.

DOJKOV, I.; STAYANOV, S.; NINOV, J.; PETROV, B., On the consumption of lime by metakaolin, fly ash and Kaoline in model systems, **Journal of chemical Technology and Metallurgy**, vol. 48, pp 54-60, 2013.

DOREA, L; SALES, A.; SILVEIRA, P. Avaliação patológicas da estrutura de concreto armado e dos componentes de uma edificação de 1914. **Scientia Plena**, Vol.6 Num.12, 2010.

DUAN, P; SHUI, Z; CHEN, W., SHEN, C., Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, **Construction and Building Materials**, vol. 44, pp 1-6, 2013.

DUVAL, R.; KADRI, E.H.; Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, **Cement and Concrete Research**, vol. 28:4, pp. 533-547, 1998.

FERREIRA, C.; BERGMANN, C., Transport of  $\text{Ca}^{+2}$  and  $\text{SO}_4^{-2}$  Ions in Porous Media of Clay Product and Its Association with the Efflorescence Phenomenon, **Transport in Porous Media** vol. 85, pp. 905-917, 2010

FRAYY, A.; BIJEN, J.M.; HAAN, Y.M.; The reaction of fly ash in concrete a critical examination, **Cement and Concrete Research**, vol. 19, pp. 235-246, 1989.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit Habitacional no Brasil (2013-2014)**. Belo Horizonte, 2016.

GARCIA, E.; CABRAL, M.; QUARCIONI, V.A.; CHOROLI, F.F. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico, **Cerâmica Industrial**, vol. 19 (4), 2014.

GIVI, A.N.; RASHID, S.A.; AZIZ, F.N.; SALLEH, M.A.M.; Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete, **Construction and Building Materials**, vol. 24, pp. 2145-2150, 2010.

GLEIZE, P.J.P.; MÜLLER, A.; ROMAN, H.R. Microstructural investigation of a silica fume-cement-lime mortar, **Cement & Concrete Composites**, vol. 25, pp. 171-175, 2003

GONÇALVES, T. – Cristalização de sais solúveis em materiais porosos. **Seminário Materiais em ambiente marítimo**, Funchal. 2007.

GRANATO, J.E. **Patologia das fachadas revestidas de cerâmica e granito**. São Paulo: Viapol, 2005. Notas de aula do curso de patologia das construções.

GRUBER, K.A.; RAMLOCHAN, T.; BODDY, A.; HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A., Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, **Cement & Concrete Composites**, vol 23. pp. 479-484, 2001.

GUACELLI, P.A.G., **Substituição da areia natural por área de britagem de rochas basálticas para argamassas de revestimento**, Dissertação de mestrado, UEL, Londrina, 2010.

HALAMICOVA P.; DETWILER R.J.; BENTZ D.P.; GARBOCZI E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. **Cement and Concrete Research**, vol. 25 (4), pp. 790–802, 1995.

HALL, C.; YAU, M.H.; Water Movement in Porous Building Materials. The Water Absorption and Sorptivity of Concretes, **Building and Environment**, vol. 22 (1), pp. 77-72, 1987.

HASHIM, Z.; HAMID, R., Effect of Metakaolin on the Strenght and Pore Distribution of Concrete, **Materials Science Forum** n.803, pp. 222-227, 2015.

HELENE, P.; PEREIRA, F. **Rehabilitación y Mantenimiento de Estruturas de Concreto, Patrocinio**: Sika, São Paulo, 2007.

HELENE, P. R. L.; **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. – (Tese de Livre Docência) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HENNETIER, J.; ALMEIDA, J.V.; CORREIA, A.M.S; FERREIRA, V.M., Efflorescence and its quantification in ceramic building materials. **British Ceramic Transactions**, vol 100 n.2. Londres, 2001.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**, tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J., GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.; MEDEIROS, M.; Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado, **Revista matéria**, vol. 22, 2017.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Relatório de Pesquisa**, 2012.

JANG, H.; KANG, H.; SO, S., Colour expression characteristics and physical properties of colored mortar using ground granulated blast furnace slag and White Portland Cement, **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol. 4, pp 1125-1132, 2014.

KANG, S.; KWON, S. Effect of red mud and Alkali-Activated Slag Cement on efflorescence in cement mortar, **Construction and Building Materials** vol. 133, pp. 459-467, 2017.

KANI, E.; ALLAHVERDI, A.; PROVIS, J. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, **Cement & Concrete Composites** vol. 34, pp. 25-33, 2012.

KANNING, R.C., **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2013.

KHAN, M.; ALHOZAIMY, A. Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete, **Canadian Journal of Civil Engineering**, vol 38, pp. 71-78, 2011

KHATER, H., Influence of Metakaolin on resistivity of cement mortar to manesium chloride solution, **Ceramics-Silikáty** vol 54, pp. 325-333, 2010.

KOSMATKA, S.H.; KERHOFF, B.; PANARESE, W.C.; **Design and Control of Concrete Mixtures**, 4a Edição, Portland Cement Association, Illinois, EUA, 2008.

KRESSE, P. Efflorescence—mechanism of occurrence and possibilities of prevention. **Beton und Fertigteil Technik**, vol. 53, pp.160–168. Alemanha, 1987.

LAM, L.; WONG, Y.; POON, C. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems, **Cement and Concrete Research**, vol 30, pp. 747-756, 2000.

LOPES, M.; SILVA, F.; NEPOMUCENO, A., Avaliação da durabilidade de concretos com e sem adição de sílica ativa para resistências entre 50 e 60MPa, **Congresso Brasileiro do Concreto**, vol. 41, São Paulo, 1999.



MACIOSKI, G., **Estudo da álcali-ativação de pó de blocos cerâmicos com cal hidratada**, Dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba, 2017.

MAHAYUDDIN, A.; ZAHARUDDIN, W. Quantification of Waste in Conventional Construction, **International Journal of Environment Science and Development**, vol. 4, pp. 296-299, 2013.

MARCONDES, C.G.N.; MOREIRA, C.A.S., Levantamento quantitativo de manifestações patológicas de descolamento e eflorescência em fachada de edifícios com revestimento cerâmico no bairro batel e imediações de Curitiba. **Revista Técnico-Científica CREA-PR**, vol. 4, pp. 1-14, 2016.

MARTYS, N.S.; FEFFARIS, C.F., Capillary transport in mortars and Concrete, **Cement and Concrete Research**, vol. 27 (5), pp. 747-760, 1997.

MATTE, V.; MORANVILLE, M., Durability of Reactive Powder Composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. **Cement & Concrete Composites**, vol. 21, pp. 1-9, 1999.

MEDEIROS, M.F.M.; HELENE, P., Estimativa da elevação da vida útil do concreto armado através do coeficiente de difusão de cloretos, **Boletim Técnico da USP**, São Paulo, 2008

MEDEIROS, M.F.M.; RAISDORFER, J.W.; HOPPE, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c, **Ambiente Construído**, vol. 17, pp. 125-139, 2017a.

MEDEIROS, M.; RAISDORFER, J.W.; HOPPE, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; Partial replacement and addition of fly ash in Portland Cement: influence on carbonation and alkali reserve, **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 2017b.

MELANDER, J., **Masonry: Design and Construction, Problems and Repair**, ASTM, Filadélfia, 1993.

METHA, P.; MONTEIRO, P., **Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 4ª Edição. Ibracon. São Paulo, 2014.

MILLS, I.; CVITAS, T.; KLAUS, H.; KALLAY, N.; KUCHITSU, K.; **Quantities, units and symbols in physical chemistry**, IUPAC, Blackwell Science, 2a. Edição, Oxford, 1993.

NAKAMURA, J. **Minha casa na mira**, Revista Construção Mercado, ed. 132, 2012. <[http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao construo/132/artigo284024-1.aspx](http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao/construcao/132/artigo284024-1.aspx)> acesso 13 de abril de 2017.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**, Editora Bookman, 5ª edição, Porto Alegre, 2016.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S., **Advanced Concrete Technology**, Editora Elsevier, 2003.

PADARATZ, I. J.; CANOVA, J.A.; DE MORI, L.M.; BOTTER, R.R., Incidência patológicas em fachas e áreas comuns de edificações para ensino – caso do campus da Universidade Estadual de Maringá. **ENTAC**. Foz do Iguaçu, 2002.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100-year perspective. **Cement and Concrete Research**, p.1384–1356, 2007

PERNICOVÁ, R. The susceptibility of forming efflorescence on concrete depending on the mold-releasing agent. **Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering** – pp. 151 – 154. Coréia do Sul, 2016.

PONS, C.S.; KOU, S.C., LAM, L.; Compressive strenght chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, **Construction and Building Materials**, vol. 20, pp. 858-865, 2006.

POON, C.S.; LAM, L.; WONG, L.Y, Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete, **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 11, pp. 197-205, 1999.

POSSAN, E.; FAGAÇA, J.; PAZUCH, C. Sequestro de CO<sub>2</sub> devido à carbonatação do concreto: Potencialidades da barragem de Itaipú, **Revista de estudos ambientais**, v.14, pp-28-38, 2012.

QUARCIONI, A.; CHOTOLI, F. E ALEIXO D. – Ensaio acelerado para simular a formação de eflorescência em argamassas endurecidas. **V SBTA** – São Paulo, 2003.

QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F.; COELHO, A.C.V.; CINCOTTO, M.A.; Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials, **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, vol. 8(1), pp. 1-7, 2015.

REGATTIERI, C.E.X.; SILVA, M.G.; HELENE, P.; Contribuição ao estudo das propriedades do concreto com vistas à durabilidade, **International Congresso n high-performance concrete and quality of concrete structures**, Florianópolis, 1996.

RIBEIRO, R. **Qual percentual médio do orçamento corresponde a cada etapa de obra**, 2015. Disponível em: < <https://estilo.uol.com.br/casa-e-decoracao/listas/qual-percentual-medio-do-orcamento-corresponde-a-cada-etapa-da-obra.htm>>. Acesso em 13 de abril de 2017.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.T., **Projeto de experimentos**, Porto Alegre: FEENG-URGS, 2003.

RITCHIE, T. Study of Efflorescence Produced on Ceramic Wicks by Masonry Mortar, **Journal of the American Ceramic Society**, vol. 38 (10), pp. 362-366, 1955.

SAITO, H.; DEGUSHI, A. Leaching tests on different mortars using accelerated eletromechanical method. **Cement and Concrete Research**, vol. 30, pp. 1815-1825, 2000.

SAKAI, E.; MIYAHARA, S.; OHSAWA, S.; LEE, S.; DAIMON, M., Hydration of fly ash cement, **Cement and Concrete Research**, vol. 35, pp. 1135-1140, 2005.

SAMIEI, R.R.; DANIOTTI, B.; PELASATO, R.; DOTELLI, G., Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates, **Construction and Building Materials**, vol. 84, pp. 84-94, 2015.

SANTOS, P.; SILVA FILHO, A. **Eflorescência: causas e consequências**. Salvador: [s.n.], 2008

SALLES NETO, M. **Florescências em revestimentos de argamassa aplicados a substrato cerâmico e o efeito de barreira**. Tese de doutorado UnB. Brasília, 2010.

SAUTSOS, M.N.; DOMONE, P.L.J, Strenght development of low water-binder ratio mixes incorporating mineral admixtures, **Symposium of the Utilization of High-Strenght Concrete**, vol. 2, pp. 945-952, 1993.

SCHAMSAI, A.; PEROTI, S.; RAHMANI, K.; RAHEMI, L., Effect of Water-Cement Ratio on abrasive strength, porosity and permeability of nano-silica concrete, **World Applied Sciences Journal**, vol. 17(8), pp. 929-933, 2012.

SILVA, N.G., **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**, Dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba, 2006.

SILVA, N.G.; CAMPITELI, V.C., Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas, **Anais do ENTAC 2006**, Florianópolis, 2006.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON, v.1. p. 809-848, 2011.

SONG, H.; PACK, S.; NAM, S.; JANG, J.; SAWASWATHY, V., Estimation of permeability of silica fume cement concrete, **Construction and building Materials**, vol. 24, pp. 315-321, 2010.

TEYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2a Edição. Londres: Thomas Telford, 1997. 459p.

TIRONI, A.; SCIAN, A.N.; IRASSAR, E.F., Blended Cements with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay: Filler and Pozzolanic Effects, **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 29 (9), 2017.

TRNÍK, A.; SCHEINHERROVA, L.; CERNY, R.; Influence of Silica fume on the hydration of Cement Pastes Studied by Simultaneous TG-DSC Analysis, **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, vol. 11 (8), 2017.

TSIVILIS, S.; TSANTILAS, J.; KAKALI, G.; CHANIOTAKIS, E.; SAKELLARIOUS, A., The permeability of Portland limestone cement concrete, **Cement and Concrete Research**, vol. 33, pp. 1465-1471, 2003.

UEMOTO, K.L., **Patologia: Danos causados por eflorescência**, Tecnologia de Edificações, Pini, IPT São Paulo, 1988.

ULM, F.J.; HEUKAMP, F.H.; GERMAINE, J.T., Durability Mechanics of Calcium Leaching of Concrete and Beyond, **Fracture Mechanics of Concrete Structures**, Balkema Publishers, pp. 133-143, Lisse, 2001.

UNEP. **Waste and Climate Change: Global trends and strategy framework**, Japão, 2016.

USGBC – U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **Building and Climate Change**, Washington, 2014.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S.; Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, **Construction and Building Materials**, vol. 41, pp. 879-888, 2013.

VÁZQUEZ, M.; GALÁN, E.; GERRERO, M.A.; ORTIZ, P., Digital image processing of weathered stone caused by efflorescence: A tool for mapping and evaluation of stone decay, **Construction and Building Materials**, vol. 25, pp. 1603-1611, 2011.

VERDUCH. A.; SOLANA, V. **Formação de eflorescências na superfície dos tijolos**. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 38-46, 2000

VIEIRA, M.; ALMEIDA, I.R.; GONÇALVES, A.F.; Influence of moisture curing on durability of fly ash concrete for road pavement, **CANMET – International Conference on Durability of Concrete**, 5a Edição, Barcelona, 2000.

WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W., Fly ash effects II. The active effect of fly ash, **Cement and Concrete Research**, vol 34, pp. 2057-2060, 2004.

WEI, O.; SUTAN, N., The Influence of Finely Ground Mineral Admixture (FGMA) on Efflorescence, **USIMAS Journal of Civil Engineering**, n. 4, pp 50-55, 2013.

WENG, T.; LIN, W.; CHENG, A. Effect of Metakaolin on Strenght and Efflorescence Quantity of Cement-Based Composites. **The Scientific World Journal**, vol. 2013, pp. 1-11; 2013.

WENG, J.; LANGAN, B.; WARD, M., Pozzolanic reaction in Portland Cement, silica fume and fly ash mixtures, **Canadian Journal of Civil Engineering**, vol. 24, pp. 754-760, 1997.

WINSLOW, D.; LIU, D., The pore structure of past in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 20, pp. 227-234, 1990.

WINSLOW, D.; COHEN, M.D.; BENTZ, D.P.; GARBOCZI, E.J., Percolation and pore structure in mortars and concrete. **Concrete and Cement Research**, vol. 24, pp. 25-37, 1994.

XUE, B.; QIAN, C., Mitigation of efflorescence of wallboard by means of bio-mineralization, **Frontiers in Microbiology** vol. 20, 2015.

YAO, X.; YANG, T.; ZHANG, Z. Compressive Strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash-slag blends associated with efflorescence. **Materials and Structures** vol. 49, pp. 2907-2918, 2016.

YIGITER, H.; YAZICI, H.; AYDIN, S., Effects of cement type, water/cement ratio and cement concent on sea water resistance of concrete, **Building and Environment**, vol. 42, pp. 1770-1776, 2007.

YOGENDRAN, V.; LANGAN, B.W.; HAQUE, M.N.; WARD, M.A., Silica fume in high-strength concrete, **ACI Journal Materials**, vol. 84, pp. 124-129, 1987.

ZEHNDRER, K.; ARNOLD, A.; Crystal Growth in salt efflorescence, **Journal of Crystal Growth**, vol. 97, pp. 513-521, 1989

ZELIC, J.; KRSTULOVIC, R.; TKALCEC, E.; KROLO, P., Durability of the hydrated limestone-silica fume Portland cement mortars under sulphate attack, **Cement and Concrete Research**, vol. 29, pp. 816-826, 1999.

## ANEXOS

TABELA 20 – TABELA ANOVA – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE - CAL

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,103134	2	0,551567	50,36901	0,000178	5,143253
Dentro dos grupos	0,065703	6	0,010951			
Total	1,168837	8				

TABELA 21 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO AR+CALOR - CAL

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,06946	2	0,03473	49,26589	1,42E-05	4,256495
Dentro dos grupos	0,006345	9	0,000705			
Total	0,075804	11				

TABELA 22 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO COPO - CAL

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,405349	2	0,202675	157,757	9,85E-08	4,256495
Dentro dos grupos	0,011563	9	0,001285			
Total	0,416912	11				

TABELA 23 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO POTE - CAL

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,11677	2	0,058385	198,5635	3,59E-08	4,256495
Dentro dos grupos	0,002646	9	0,000294			
Total	0,119416	11				



TABELA 24 – TABELA ANOVA – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE - POZOLANAS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,290297	4	0,072574	9,392821	0,002031	3,47805
Dentro dos grupos	0,077266	10	0,007727			
Total	0,367563	14				

TABELA 25 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO AR+CALOR - POZOLANAS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,160428	6	0,026738	36,90544	4,27E-10	2,572712
Dentro dos grupos	0,015215	21	0,000725			
Total	0,175643	27				

TABELA 26 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA - MÉTODO COPO - POZOLANAS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,846985	4	0,211746	80,39514	6,02E-10	3,055568
Dentro dos grupos	0,039507	15	0,002634			
Total	0,886492	19				

TABELA 27 – TABELA ANOVA – EFLORESCÊNCIA -MÉTODO POTE - POZOLANAS

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,145054	4	0,036264	70,72731	1,5E-09	3,055568
Dentro dos grupos	0,007691	15	0,000513			
Total	0,152745	19				